



Città Metropolitana di Bologna

Via Zamboni, 13 - 40126 Bologna (BO)

IL RUP:

P.I.E. Stefano Romagnoli

IL DIRETTORE DELL'ESECUZIONE DEL CONTRATTO:

Ing. Jonathan Manzi

INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA

(CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)

PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA

ELABORATI GENERALI

-

Relazione geotecnica di caratterizzazione

PROGETTAZIONE:
Mandataria:

SYSTRA S.p.A.

Via della Stazione, 27 38123 Trento (TN), Italy - www.systra.com/italy

Mandanti:



SETECO Ingegneria S.r.l.

ITEC Engineering S.r.l.

SCALA: ---		IL PROGETTISTA: Ing. Erica Calatizzo	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE: Ing. Erica Calatizzo	
FORMATO: A4	DATA: Apr 2026			

REV.	DESCRIZIONE	REDATTO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	DATA
r00	Emissione	C.Ghirardini	Apr 2026	A. Oss	Apr 2026	M. Ravelli	Apr 2026

CODICE PROGETTO	LIVELLO PROGETTAZIONE	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.
24V25	PF	R	GE	102	r00

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

INDICE

1.	PREMESSA	4
1.1	IDENTIFICAZIONE DEL PROGETTO	4
2.	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	5
3.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO	6
3.1	INQUADRAMENTO GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO, IDROGEOLOGICO	6
3.2	INQUADRAMENTO SISMICO	8
4.	INDAGINI	10
5.	CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	12
5.1	GENERALITÀ	12
5.2	TERRENI A GRANA GROSSA (SABBIE E GHIAIE PIÙ O MENO LIMOSE)	14
5.2.1	INTRODUZIONE	14
5.2.2	STATO INIZIALE DEL DEPOSITO	15
5.2.3	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	15
5.2.4	CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ	15
5.2.5	COEFFICIENTI DI PERMEABILITÀ	18
5.3	TERRENI A GRANA FINE (LIMI E ARGILLE SATURI)	19
5.3.1	INTRODUZIONE	19
5.3.2	CLASSIFICAZIONE DEI MATERIALI	19
5.3.3	STATO TENSIONALE INIZIALE	24
5.3.4	RESISTENZA AL TAGLIO NON DRENATA	25
5.3.5	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA AL TAGLIO IN TERMINI DI SFORZI EFFICACI	26
5.3.6	CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ	26
5.3.7	COEFFICIENTI DI PERMEABILITÀ E DI CONSOLIDAZIONE PRIMARIA E SECONDARIA	27
6.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	28
6.1	UNITÀ RILEVATO ESISTENTE	28
6.1.1	PROPRIETÀ FISICHE	28
6.1.2	STATO INIZIALE DEL DEPOSITO	29
6.1.3	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	30
6.1.4	CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ	32
6.1.4.1	Modulo elastico a basse deformazioni	32
6.1.4.2	Modulo elastico operativo	33
6.1.4.3	Parametri edometrici	34
6.1.5	CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ	35
6.1.6	SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI	35
6.2	UNITÀ INCOERENTI (SABBIE LIMOSE, SABBIE E GHIAIA)	36
6.2.1	PROPRIETÀ FISICHE	37
6.2.2	STATO INIZIALE DEL DEPOSITO	38
6.2.3	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	38

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

6.2.4	CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ	39
6.2.4.1	Modulo elastico a basse deformazioni	39
6.2.4.2	Modulo elastico operativo	40
6.2.5	CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ	41
6.2.6	SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI	42
6.3	UNITÀ COESIVE	42
6.3.1	PROPRIETÀ FISICHE	42
6.3.2	STATO TENSIONALE INIZIALE	44
6.3.3	CARATTERISTICHE DI RESISTENZA	45
6.3.3.1	Condizioni non drenate	45
6.3.3.2	Condizioni drenate	45
6.3.4	CARATTERISTICHE DI DEFORMABILITÀ	46
6.3.4.1	Modulo elastico a basse deformazioni	46
6.3.4.2	Modulo elastico operativo	46
6.3.4.3	Parametri edometrici	47
6.3.5	CARATTERISTICHE DI PERMEABILITÀ	48
6.3.6	SINTESI DEI PARAMETRI GEOTECNICI	48
7.	MODELLO GEOTECNICO	49
7.1	SPONDA DESTRA	50
7.2	SPONDA SINISTRA	51
8.	BIBLIOGRAFIA	52

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

1. PREMESSA

Il presente documento rappresenta la relazione geotecnica di caratterizzazione del Progetto di Fattibilità Tecnico Economica (PFTE) dei servizi di supporto alla progettazione e all'esecuzione dei lavori relativo all'intervento di "RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SULLA S.P. 6 AL KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA" - CUP C51B23000440001 (ALLUVIONE MAGGIO 2023 - 2024VIMASNC25).

Questa relazione è stata sviluppata sulla base di dati bibliografici e dei dati delle indagini eseguite nel 2024, con lo scopo di integrare il quadro conoscitivo fornito nella fase progettuale precedente e da fornire una caratterizzazione geotecnica per i siti in oggetto. I risultati dello studio costituiscono dati di progetto per il dimensionamento delle opere previste nell'area in esame.

Nella presente relazione sono trattati i seguenti argomenti:

- Nel capitolo 2 sono elencate le normative e i documenti di riferimento;
- Nel capitolo 3 è riportata una sintesi del quadro geologico e sismico di riferimento;
- Nel capitolo 4 è riportata la descrizione delle indagini prese a riferimento nello studio;
- Nel capitolo 5 sono riportati i criteri per la caratterizzazione geotecnica;
- Nel capitolo 6 è riportata la caratterizzazione geotecnica;
- Nel capitolo 7 è riportato il modello geotecnico per le due sponde;
- Nel capitolo 8 sono riportati i riferimenti bibliografici.

1.1 Identificazione del progetto

I dati principali del progetto sono riportati nella tabella seguente:

TIPOLOGIA MODELLO DISCIPLINARE	CONTENUTO MODELLO
CUP	C51B23000440001
Denominazione opera	ID 0060075 Ponte Torrente Idice km 11,776
Codice PBM	2024VIMASNC25
Stazione Appaltante	Città Metropolitana di Bologna (CMBO)
RUP	P.i.E. Stefano Romagnoli
Localizzazione geografica dell'intervento	S.P. 6 "Zenzalino" al Km 11,776 tra i Comuni di Budrio e Molinella
Descrizione del progetto	RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SULLA S.P. 6 AL KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA
Identificazione della fase di incarico (come da Codice dei Contratti Pubblici)	PFTE

Tabella 1: Identificazione del progetto

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

2. NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

2.1 Normativa

Si riporta di seguito l'elenco delle Normative a cui si è fatto riferimento per la stesura della presente relazione:

1. Eurocodice 7. Progettazione geotecnica, 2004;
2. Eurocodice 8. Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti di geotecnica, 2004;
3. OPCM n.3274 del 08/05/2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e relativi allegati e s.m.i.;
4. OPCM n.3519 del 28 aprile 2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone";
5. Norme Tecniche per le Costruzioni. DM 14 gennaio 2008;
6. Istruzione per l'applicazione delle Norme Tecniche. Circ. Min. 2 febbraio 2009 n. 617;
7. Aggiornamento Norme Tecniche per le Costruzioni DM 17 gennaio 2018.
8. Circolare del 21 gennaio 2019 – Istruzioni per l'applicazione dell'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni, di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018;
9. BS EN ISO 22282-2-2012 - Water permeability tests in a borehole using open systems

2.2 Elaborati di riferimento

Si riporta di seguito l'elenco degli elaborati di riferimento della precedente fase progettuale, ovvero riferita alla documentazione DOCFAP:

10. 2347R6010P0 (Relazione geologica)
11. 2347R6011P0 (Rapporti di indagine)
12. 2347R6020P1 (Relazione geotecnica)
13. 2347R6030P0 (Relazione sismica)
14. 2347G6010P0 (Ubicazione indagini e sezione stratigrafica)

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

3. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E SISMICO

3.1 Inquadramento geologico, geomorfologico, idrogeologico

L'area in oggetto è ubicata nella Pianura Padana, dove, come indicato dalla carta geologica d'Italia in scala 1:50 000 foglio 221 "Bologna", affiora l'Unità di Modena (AES8a) riferibile all'epoca Pleistocene – Olocene. Essa comprende sabbie, argille, limi e subordinatamente, ghiaie di piana alluvionale. Il limite inferiore è inconforme ed è marcato da una superficie di erosione fluviale lateralmente correlata a un suolo da decarbonato a parzialmente carbonato.

Il sistema deposizionale e la litologia di AES8a sono rappresentati da sabbie e limi di canale, argine e rotta fluviale. Si tratta di sabbie da finissime a grossolane, localmente limose, in strati a base erosiva, da sottili a molto spessi, a stratificazione obliqua concava, alternate a limi sabbiosi e subordinatamente a limi argillosi, in strati molto sottili e sottili. Alla base sono presenti sabbie grossolane a stratificazione obliqua concava e, localmente, ghiaie. Formano corpi sedimentari a geometria prevalentemente nastriforme e tabulare-allungata, passando lateralmente e verticalmente verso il basso a depositi di piana inondabile.

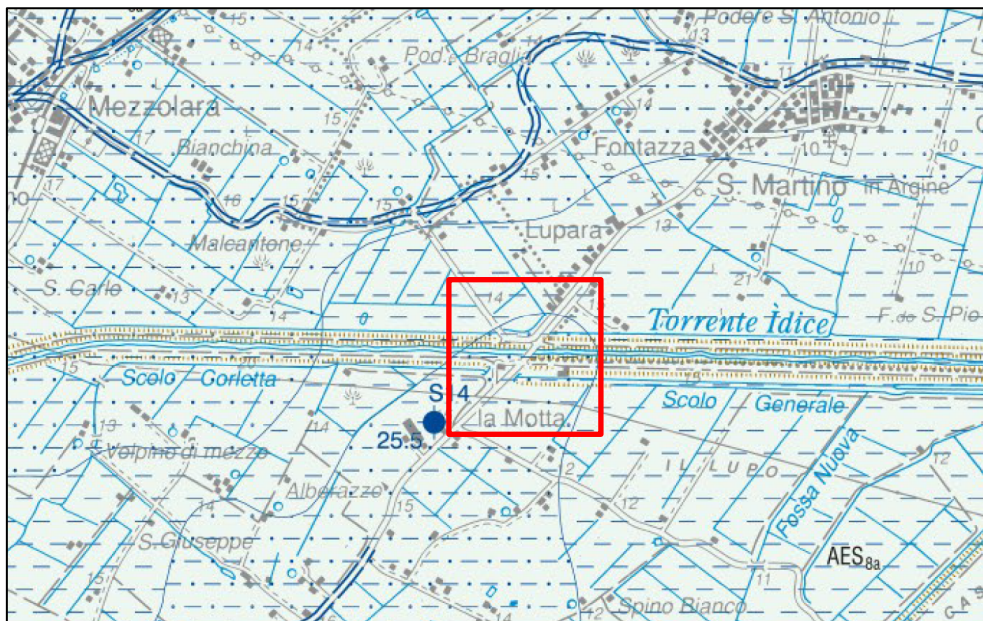


Figura 1: Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 - Foglio 221 "Bologna" (Fonte: ISPRA).

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

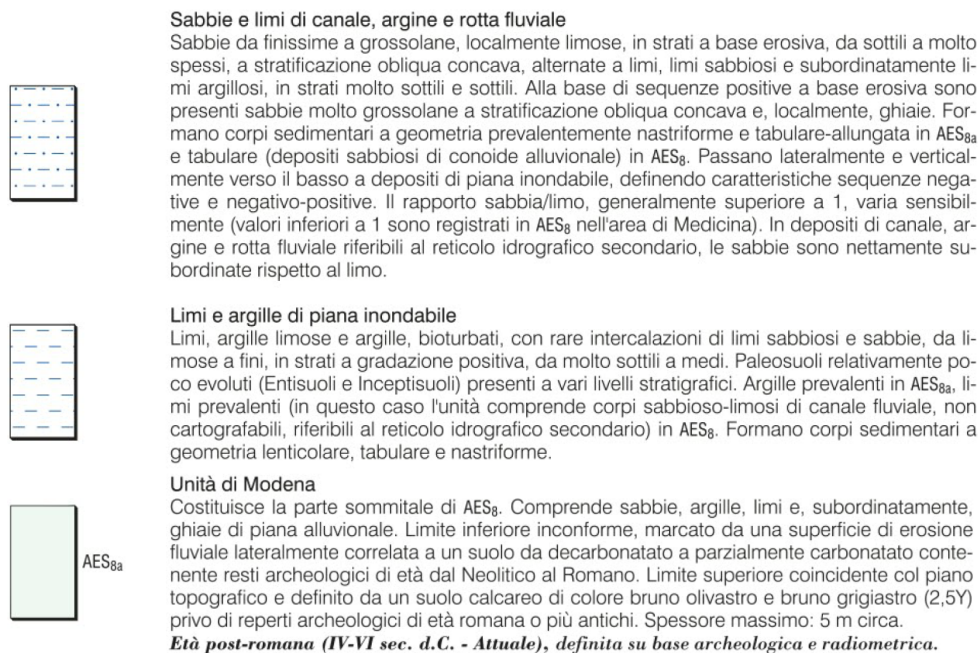


Figura 2: Stralcio della Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 - Foglio 221 "Bologna" (Fonte: ISPRA).

Dal punto di vista geomorfologico, l'area ricade nel settore di passaggio tra la media e la bassa Pianura Padana caratterizzato da moderate ondulazioni che degradano progressivamente verso Nord, ad una quota media di 15.00 m s.l.m., in una zona pressoché pianeggiante. La morfologia superficiale ha risentito del costante intervento antropico, soprattutto sotto forma di presenza di vari fossi di scolo e canali, che nelle fasi di tracimazione e sedimentazione, hanno depositato lenti alluvionali inter-digitate tra loro, conferendo alla zona un andamento sub-orizzontale leggermente ondulato.

A partire dal 1950 in tutto il territorio della pianura emiliana si è avuto un abbassamento del suolo, con valori diversi da zona a zona, che è stato messo in relazione con l'intensificarsi dello sfruttamento delle risorse idriche sotterranee per fini idropotabili ed industriali. Per una pianura alluvionale come quella dell'Emilia-Romagna i valori di subsidenza naturali attesi sono dell'ordine di 1÷3 mm/anno. Nell'area di progetto si sono registrati, tra il 2006 ed il 2011, velocità di movimento verticale del suolo inferiori a 2.5 mm/anno (dati Arpa Emilia-Romagna), quindi in linea con le attese.

L'idrografia superficiale primaria è rappresentata dal Torrente Idice e quella secondaria da fossi di scolo che bordano le zone coltivate e che raccolgono le acque di precipitazione. La naturale idrografia e idrologia dell'area ha risentito molto delle necessità agricole che hanno modificato la naturale disposizione dei fossi di scolo in relazione alle esigenze delle opere agricole.

L'acquifero può essere classificato come multi-falda, con una falda superficiale e con altre falde, localmente in pressione e intercomunicanti, data la discontinuità sia degli orizzonti trasmissivi sia di quelli meno permeabili. La falda superficiale si alimenta prevalentemente per infiltrazione diretta, mentre quelle più profonde sono alimentate prevalentemente per ricarica da monte (Sud-Ovest).

La falda più superficiale è stata rilevata nella CPTu1 (in sponda destra, lontana circa 51 m dall'asse del tracciato) con soggiacenza di circa 2 m da p.c. in base alla misura della pressione interstiziale eseguita con il piezocono durante la penetrazione. Sempre in sponda destra, la cella Casagrande più superficiale del sondaggio S1 ha registrato una soggiacenza di circa 11,3 m. In questo caso, tuttavia bisogna considerare l'altezza del rilevato esistente. La ricostruzione dell'altezza del rilevato, eseguita con

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

l'ausilio dalle sezioni topografiche trasversali e dalle loro intersezioni con la sezione longitudinale, presenta alcune incertezze; tuttavia, in corrispondenza del sondaggio S1, può essere stimata pari a circa 13 metri, anche in ragione della presenza di frammenti di laterizi fino a tale profondità. Il valore di 11,35 metri risulta quindi convertibile in 8,6 m.s.l.m., quota in accordo con gli 8,35 m.s.l.m. della prova CPTu1.

La seconda cella Casagrande, installata nel sondaggio S1 a profondità di 25 m al di sotto di un livello di limo argilloso/argilla limosa, ha registrato la presenza di una falda confinata o semi-confinata in pressione, in quanto il livello piezometrico è ubicato a circa 11 m da p.c.

In sponda sinistra si ha a disposizione il dato di soggiacenza circa 8,5m di profondità da p.c. nella prova CPTu2 ricavato dalla misura della pressione neutra durante l'infissione del piezocono. Anche in questo caso si deve sottrarre lo spessore del rilevato, che è stato valutato in circa 6-6,5m. La soggiacenza, quindi, è di circa 2 m da p.c. anche in questo caso e la quota assoluta è di 8,24 m.s.l.m. Si sottolinea come i dati delle CPTu siano puntuali ovvero riferiti alla data di esecuzione delle prove, mentre le letture piezometriche risultano limitate al periodo aprile-maggio 2024.

3.2 Inquadramento sismico

L'Ordinanza del Presidente del C.d.M. n. 3274 del 20/3/2003 ha introdotto la nuova classificazione sismica del territorio italiano che viene diviso in 4 zone sismiche, ciascuna caratterizzata da un diverso valore del parametro ag (accelerazione massima convenzionale su suolo di categoria A). Con le Norme Tecniche per le Costruzioni del settembre 2005 è stato specificato che per le zone 1, 2 e 3 è possibile una suddivisione in sottozone caratterizzate da valori di ag intermedi rispetto a quelli citati e intervallati da valori non minori di 0.025.

La Gazzetta Ufficiale del 11/5/2006 ha pubblicato l'Ordinanza del PdCM del 28 aprile 2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone" (Ordinanza n. 3519) con la quale sono approvati i criteri generali e la mappa di pericolosità sismica di riferimento a scala nazionale. Le valutazioni di ag sono calcolate su un numero sufficiente di punti (griglia non inferiore a 0.05°), corredate da stime dell'incertezza. I valori di ag sulle griglie suddette sono stati pubblicati sul sito web dell'INGV. La documentazione di interesse è riportata nella mappa seguente (Figura 3). I valori di pericolosità sismica riportati sono espressi in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ($V_s > 800$ m/s). Osservando la mappa si evince che l'area in oggetto ricade in zona sismica 2, con valori di ag compresi fra 0.150 e 0.20 g.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

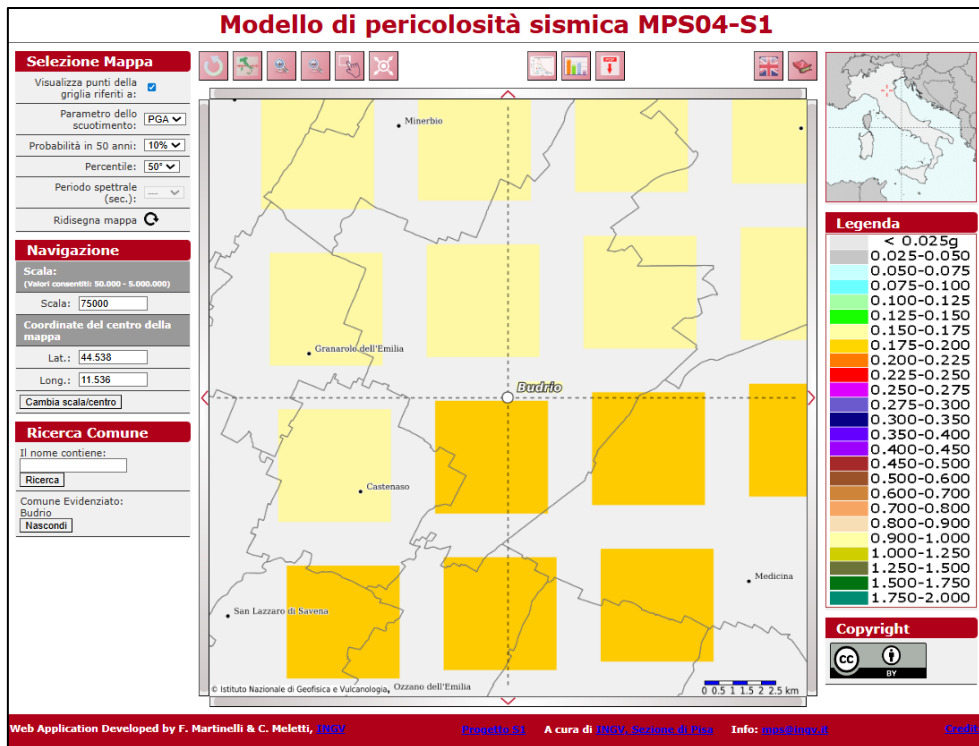


Figura 3: Mappa di pericolosità sismica del Comune di Budrio (MPS04-S1), dal sito INGV. I colori della legenda indicano le diverse accelerazioni del suolo.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

4. INDAGINI

Ai fini della caratterizzazione geotecnica delle formazioni interessate dalle opere presenti in questa relazione, sono stati utilizzati i dati provenienti dalle seguenti campagne di indagini geognostiche:

- Campagna indagini del 2024 (Fase DOCFAP), durante la quale sono stati eseguiti:
 - n. 2 sondaggi a carotaggio continuo di profondità 50m, S1 in sponda destra e S2 in sponda sinistra, entrambi con esecuzione di prove SPT, come indicato in Tabella 2;
 - n. 2 prove penetrometriche statiche a punta elettrica e piezocono, CPTu1 in sponda destra, di profondità 29.6m e CPTu2 in sponda sinistra, di profondità 33.1m;
 - n. 1 prova con dilatometro Marchetti;
 - prelievo di campioni rimaneggiati e indisturbati;
 - installazione di n. 2 celle di Casagrande nel foro di sondaggio S1, le cui misure sono riportate in Tabella 3;
 - prove di laboratorio sui campioni estratti, come indicato in Tabella 4.

Durante la stessa sono inoltre state eseguite le seguenti indagini geofisiche:

- n. 2 prospezioni sismiche di tipo MASW, MASW1 in sponda destra e MASW2 in sponda sinistra;
- n. 2 indagini sismiche di tipo HVSR;
- n. 1 indagine di tipo DownHole nel foro di sondaggio S2.



Figura 4: Ubicazione indagini pregresse (DOCFAP)

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

Sondaggio	z (m)	Quota (slm)	Strumentazione	SPT	Campioni indisturbati	Campioni rimaneggiati
S1	50		Piezometro	16	4	4
S2	50		DownHole	15	4	3

Tabella 2: Sondaggi pregressi (DOCFAP) considerati per la caratterizzazione

Sondaggio	Profondità cella Casagrande (m da boccaforo)	05/04/2024	26/05/2024
S1	17	11.3	11.0
	25	11.1	11.0

Tabella 3: Misure piezometriche effettuate durante le indagini pregresse

Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	Curve granulometriche	Peso di volume e contenuto d'acqua	Limiti Atterberg	Taglio Diretto	Prova edometrica
S1	CI1	3.3	X	X	X	X	X
	CR1	6.2	X		X		
	CI2	9.3	X	X	X	X	X
	CI3	15.3	X	X	X	X	X
	CR2	20.2	X				
	CI4	24.3	X		X		
	CR3	28.2	X				
	CR4	32.2	X		X		
S2	CI1	3.3	X	X	X	X	X
	CI2	9.3	X				
	CR1	14.2	X				
	CI3	15.3	X		X		
	CR2	20.2	X		X		
	CI4	24.3	X		X		
	CR3	28.2	X		X		

Tabella 4: Prove di laboratorio eseguite durante le indagini pregresse (DOCFAP)

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

5. CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Lo scopo della caratterizzazione geotecnica, in coerenza con il modello geologico – strutturale, è stato quello di individuare:

- Il modello geotecnico del terreno che sarà utilizzato nei calcoli di progetto;
- I parametri geotecnici che si prevede di adottare per la progettazione dell'opera.

5.1 Generalità

Per la definizione dei parametri geotecnici sono stati utilizzati tutti i dati acquisiti con le prove in sito (SPT, CPT, dilatometro, ecc..) e in laboratorio.

Per la definizione delle unità geotecniche si è seguito un approccio che, nella sostanza, segue quello formazionale di tipo geologico. Questo approccio necessita ovviamente di un controllo puntuale che permetta di evidenziare eventuali differenze e anomalie all'interno delle stesse formazioni geologiche, in modo da distinguere eventuali porzioni o corpi assimilabili dal punto di vista geologico, ma geotecnicamente differenziati. In questi casi le unità geologiche sono state suddivise in sub-unità geotecniche. Una volta definite le unità geotecniche, i risultati delle indagini (in sito e in laboratorio) sono stati catalogati nell'ambito di queste unità e interpretati con i criteri classici della meccanica delle terre.

Il successivo grafico illustra in maniera schematica il percorso logico seguito nella caratterizzazione delle unità geotecnicamente omogenee. Con questo approccio si arriva quindi all'individuazione, per ogni unità geotecnica, di un campo di valori che sarà più o meno ampio a secondo della omogeneità dei materiali. Questo approccio consente di poter estrapolare, in mancanza di dati specifici e puntuali, i parametri geotecnici su basi formazionali, fermo restando che è necessario, per le principali opere d'arte, verificare che i dati specifici acquisiti nel sito rientrino nel suddetto campo di valori, cercando di limitare il più possibile il range di valori indicato in modo da limitare il livello di aleatorietà della caratterizzazione e quindi dei calcoli di dimensionamento.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

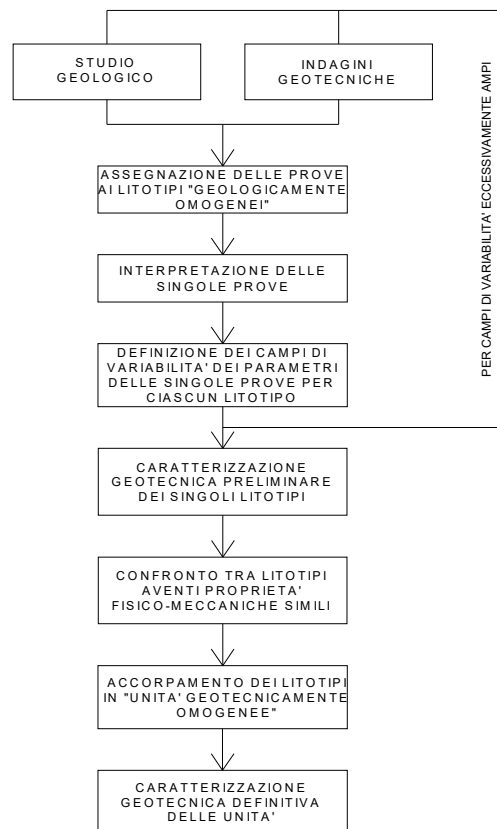


Figura 5: Diagramma di flusso illustrativo della procedura di caratterizzazione geotecnica

Laddove presenti in quantità significative (almeno 5-10 dati), i valori delle varie grandezze (misurati o ricavati da correlazioni) sono stati riportati in grafici in funzione della profondità. Per la valutazione del range di variabilità del valore di riferimento (X) si è fatto riferimento al valore medio e alla variabilità attraverso la deviazione standard ricavando un range, riportato con apposita simbologgiatura nei grafici:

$$M - dev_{st} \leq X \leq M + dev_{st}$$

con:

- M: la media dei valori ottenuti dalle diverse formulazioni utilizzate
- dev_{st} : la deviazione standard dei valori ottenuti dalle diverse formulazioni utilizzate

Nel caso delle prove SPT, media e deviazione standard sono calcolati escludendo tutti i valori corrispondenti al rifiuto della prova.

Nell'ambito del range di parametri viene indicato il valore caratteristico (che non necessariamente è quello medio), fermo restando che la scelta del parametro caratteristico potrebbe variare da zona a zona non solo per i risultati specifici della zona di interesse, ma anche per la specifica tipologia di opera e quindi per il tipo di interazione struttura/terreno.

Con tale impostazione, in questa relazione saranno descritti i criteri utilizzati per la caratterizzazione geotecnica, e quindi sarà esposta la caratterizzazione geotecnica delle varie unità.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

I criteri con i quali vengono elaborati e interpretati i dati di indagine e gli approcci metodologici per la relativa caratterizzazione geotecnica devono essere necessariamente differenziati in funzione delle caratteristiche delle singole unità.

I terreni prevalentemente granulari, per i quali è notoriamente difficile, se non impossibile, prelevare campioni indisturbati per le prove di laboratorio, sono stati caratterizzati attraverso parametri geotecnici in condizioni drenate stimati con correlazioni empiriche a partire dai risultati di prove penetrometriche in foro (SPT). Per la stima delle caratteristiche di deformabilità si fa riferimento anche alle correlazioni con le prove geofisiche. Per la definizione delle caratteristiche geotecniche dei terreni granulari sono comunque stati utilizzati i dati delle prove di laboratorio su terreni rimaneggiati, per una definizione delle caratteristiche granulometriche e di plasticità, e per una più corretta utilizzazione delle correlazioni empiriche. Alcune prove meccaniche sono state eseguite su provini ricostituiti o su alcuni campioni prelevati comunque con metodi tale da creare poco disturbo, ma che inevitabilmente devono essere considerati disturbati.

Le unità geotecniche individuate per le quali verrà eseguita la caratterizzazione sono le seguenti:

- Unità rilevato (R), costituita da materiale da rilevato utilizzato per la costruzione del vecchio ponte;
- Unità incoerenti:
 - Sabbia limosa (SL);
 - Sabbia e ghiaia (SG);
- Unità coesive (LSA), costituita limo argilloso e limo sabbioso.

5.2 Terreni a grana grossa (sabbie e ghiaie più o meno limose)

5.2.1 Introduzione

Secondo la classifica USCS si intendono a grana grossa i materiali caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori al 50%.

In conseguenza del fatto che in tali materiali risulta difficile (se non impossibile) prelevare campioni indisturbati, la caratterizzazione geotecnica è affidata principalmente all'interpretazione delle prove in sito (mediante correlazioni empiriche) e delle prove di classificazione di laboratorio effettuate su campioni rimaneggiati in accordo ai criteri descritti nei paragrafi successivi.

L'interpretazione delle prove è finalizzata a determinare principalmente i seguenti parametri:

- stato iniziale del deposito (grado di addensamento o densità relativa);
- resistenza al taglio;
- deformabilità.

Si evidenzia che le correlazioni empiriche riportate nei paragrafi seguenti sono applicabili nei casi in cui è ragionevole ritenere che le prove siano avvenute in condizioni drenate, ovvero nei seguenti casi:

- terreni sopra falda purché caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori a $\cong 50\%$.
- terreni sottofalda purché caratterizzati da percentuali di fine (limo e argilla) inferiori a $\cong 35\div 40\%$.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

5.2.2 Stato iniziale del deposito

Relativamente alla prova SPT, si riportano le correlazioni utilizzate come riferimento per la determinazione della densità relativa D_r :

Skempton (1)	$D_r = \sqrt{\frac{C_N \cdot N_{SPT}}{60}}$	Con: $C_N = \frac{2}{1 + \frac{\sigma'_v}{100}}$ (sabbie fini) $C_N = \frac{3}{2 + \frac{\sigma'_v}{100}}$ (sabbie grosse)	σ'_v in kg/cm ²									
Skempton (2)	$D_r = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{A + B \cdot \sigma'_v}}$	Con: <table> <tr> <th>Materiale</th> <th>A</th> <th>B</th> </tr> <tr> <td>Sabbie fini</td> <td>27.5</td> <td>27.5</td> </tr> <tr> <td>Sabbie grosse</td> <td>43.3</td> <td>21.7</td> </tr> </table>	Materiale	A	B	Sabbie fini	27.5	27.5	Sabbie grosse	43.3	21.7	σ'_v in kg/cm ²
Materiale	A	B										
Sabbie fini	27.5	27.5										
Sabbie grosse	43.3	21.7										
Meyerhof, 1957	$D_r = 21 \cdot \sqrt{\frac{N_{SPT}}{\sigma'_v + 0.7}}$		σ'_v in kg/cm ²									

5.2.3 Caratteristiche di resistenza

Relativamente alla prova **SPT**, si riportano le correlazioni utilizzate come riferimento per la determinazione dell'angolo di attrito ϕ .

Schmertmann	$\varphi = a + b \cdot D_r$	Con:			D _r da correlazione Skempton (2)
		Materiale	a	b	
		Sabbie fini	28	0.14	
		Sabbie medie	31.5	0.1	
		Sabbie grosse	34.5	0.1	
		Ghiaietto	38	0.08	
Wolff	$\varphi = 27.1 + 0.3 \cdot C_N \cdot N_{SPT} - 0.00054 \cdot (C_N \cdot N_{SPT})^2$				Per C _N vedi correlazione Skempton (1) per densità relativa
Japanese National Railway	$\varphi = 0.3 \cdot N_{SPT} + 27$				

I valori dell'angolo di resistenza al taglio ϕ_{cv}' sono ricavabili anche da prove di laboratorio (triassiali o di taglio diretto) su provini ricostituiti a basse densità relative.

Relativamente alla prova **CPT**, si riportano le correlazioni utilizzate come riferimento per la determinazione dell'angolo di attrito ϕ .

Robertson	$\phi' = \arctan \left[\frac{1}{2.68} \cdot \left(\log \left(\frac{R_p}{\sigma} \right) + 0.29 \right) \right]$
Kulawny & Mayne	$\phi' = 17.6 + 11 \log (R_p)$

5.2.4 Caratteristiche di deformabilità

Moduli elastici iniziali

I moduli iniziali di taglio (G_0) e di Young (E_0) possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio V_s utilizzando le seguenti equazioni:

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

$$G_0 = \frac{\gamma_t}{9.81} \cdot (V_s)^2$$

$$E_0 = G_0 \cdot 2 \cdot (1 + \nu')$$

essendo:

γ_t = peso di volume naturale del terreno in kN/m³

ν' = rapporto di Poisson del terreno = 0,15 ÷ 0,20

V_s = velocità di propagazione delle onde di taglio in m/s.

Avendo a disposizione le prove Down-Hole e MASW, la determinazione della velocità di propagazione delle onde di taglio V_s è preferenzialmente ricavata direttamente da prove geofisiche e, ove necessario, indirettamente, interpretando i risultati delle prove SPT come descritto nel punto successivo.

Relativamente alle correlazioni con le prove SPT si specifica che queste vengono usate solo nel caso in cui non si hanno a disposizione prove geofisiche e si necessita della stima delle V_s .

V_s DA PROVE SPT

Relativamente alla prova SPT, si riportano le correlazioni utilizzate come riferimento per la determinazione della velocità delle onde di taglio V_s :

		Con: C = 67.3 z = profondità in m dal p.c.						
Ohta & Goto	$V_s = C \cdot (N_{SPT})^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G$	f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedi Tabella 5:) f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedi Tabella 6:)						
		Con:						
Yoshida & Motonori	$V_s = \beta \cdot (N_{SPT})^{0.25} \cdot (\sigma'_{v0})^{0.14}$	<table><tr><th>Materiale</th><th>β</th></tr><tr><td>Sabbie fini</td><td>49</td></tr><tr><td>Qualunque terreno</td><td>55</td></tr></table> σ'_{v0} in kN/m ²	Materiale	β	Sabbie fini	49	Qualunque terreno	55
Materiale	β							
Sabbie fini	49							
Qualunque terreno	55							

f_A	Olocene	Pleistocene
	1.0	1.3

Tabella 5: relazione di Ohta e Goto, 1978 - coefficiente f_A (funzione dell'epoca geologica del deposito)

f_G	Ghiaie	Sabbie ghiaiose	Sabbie grosse	Sabbie medie	Sabbie fini
	1.45	1.15	1.14	1.07	1.09

Tabella 6: relazione di Ohta e Goto, 1978 - coefficiente f_G (funzione della composizione granulometrica del deposito)

Si specifica tuttavia che se si hanno a disposizione le velocità V_s derivanti da specifiche indagini sismiche, si preferisce adottare quest'ultime piuttosto che ricavare da correlazioni per evitare doppi passaggi interpretativi derivanti da correlazioni empiriche.

Moduli elastici operativi

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

Il comportamento dei terreni a grana grossa risulta non lineare; i moduli di deformazione risultano infatti funzione sia delle pressioni efficaci medie correnti sia del livello di deformazione indotto o del grado di mobilitazione della resistenza al taglio.

Atkinson & Sallfors (1991) e Mair (1993) individuano i campi tipici di deformazione indotti dalle opere di ingegneria civile, come mostrato in Figura 6.

Per descrivere tale comportamento dei terreni, nel caso di ricorso a metodi di calcolo elastico-lineari o elastico-lineari-plastici, si adottano valori “operativi” dei moduli elastici definiti a partire dai valori iniziali a piccole deformazioni (G_0 , E_0) mediante un fattore di riduzione R secondo le successive espressioni:

$$G = G_0 / R \qquad E = E_0 / R$$

Con $R = f$ (livello deformativo atteso, andamento curva decadimento rigidezza).

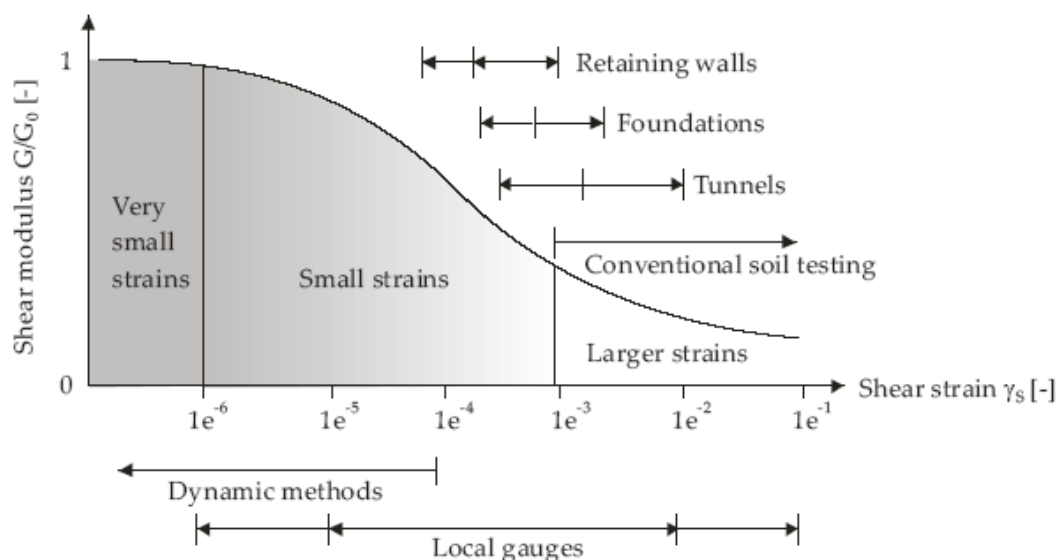


Figura 6: Decadimento della rigidezza dei terreni: livelli di deformazione tipici indotti dalle opere geotecniche (Atkinson & Sallfors, 1991; Mair, 1993)

In relazione a quanto sopra la scelta dei moduli di deformazione per le analisi ingegneristiche viene a dipendere anche dal metodo di analisi adottato.

Nel caso di ricorso a metodi di calcolo elastico-lineari o elastico – lineari - plastici, per la stima dei moduli “operativi” da associare allo specifico problema al contorno verranno fatte le seguenti assunzioni “convenzionali”:

- nell’analisi di fondazioni profonde e dirette i moduli di Young “operativi” E_{op} sono pari a circa $1/5 \cdot E_0$, ciò in considerazione del fatto che:
 - gli spostamenti totali e differenziali ammissibili per l’opera sono contenuti (i cedimenti ammissibili sono infatti generalmente inferiori a $0.01 \cdot b$, essendo b la dimensione minore della fondazione).

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

- da ciò deriva che, in base alla normativa vigente e alla pratica corrente, tale tipo di opere è caratterizzato infatti da elevati coefficienti di sicurezza nei confronti della rottura per capacità portante;
- nel calcolo dei cedimenti dei rilevati i moduli di Young “operativi” E_{op} sono pari a circa $(1/5 \div 1/10) \cdot E_0$; per tali strutture in terra possono essere infatti ammessi cedimenti totali e differenziali maggiori di quelli delle fondazioni profonde e dirette.

DA PROVE DILATOMETRICHE

I moduli elastici operativi E sono ricavabili anche da prove in situ quali prove dilatometriche. Nel caso in esame, essendo stata eseguita una prova dilatometrica sismica, il modulo elastico operativo è stato calcolato a partire dal valore E_0 , a sua volta ricavato da G_0 , a sua volta ricavato dal valore delle onde V_s , come spiegato in precedenza.

MODULI ELASTICI “OPERATIVI” DA PROVE SPT

Relativamente alla prova SPT, si riportano di seguito le correlazioni utilizzate come riferimento per la determinazione dei moduli elastici operativi E .

Denver	$E' = S_1 \cdot N_{SPT} + S_2$	Con: $S_1 = 0.756$ $S_2 = 18.75$
--------	--------------------------------	--

5.2.5 Coefficienti di permeabilità

Non essendo state eseguite prove di permeabilità quali prove Lefranc e/o Lugeon, al fine di fornire un range di permeabilità, sono state utilizzate le seguenti metodologie:

- Metodo 1: Stima dei coefficienti di permeabilità in base alla descrizione litologica in accordo con quanto indicato in Tabella 7.

k (m/s)	Grado di permeabilità	Tipo di terreno
$k > 1 \cdot 10^{-3}$	Alta	Ghiaie
$1 \cdot 10^{-3} > k > 1 \cdot 10^{-5}$	Media	Sabbie ghiaiose e Ghiaie sabbiose
$1 \cdot 10^{-5} > k > 1 \cdot 10^{-7}$	Bassa	Sabbie fini
$1 \cdot 10^{-7} > k > 1 \cdot 10^{-9}$	Molto bassa	Limi e sabbie argillose
$1 \cdot 10^{-9} > k$	Bassissima (impermeabile)	Argille

Tabella 7: Stima dei coefficienti di permeabilità in base alla descrizione litologica

- Metodo 2: Utilizzo della formula di Hazen:

$$k = C \cdot (D_{10})^2$$

Dove C è una costante compresa tra 100 e 150, k è espresso in cm/s e D_{10} in cm.

- Metodo 3: da prove CPT, sono state utilizzate le correlazioni di Robertson (2010):

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

$k = 10^{(0.952-3.04*I_c)}$	Per $1.0 < I_c \leq 3.27$
$k = 10^{(-4.52-1.37*I_c)}$	Per $3.27 < I_c < 4.0$

5.3 Terreni a grana fine (limi e argille saturi)

5.3.1 Introduzione

La caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana fine (percentuale di fine maggiore del 50%) è affidata sia all'interpretazione delle prove di laboratorio sia all'interpretazione delle prove in sito in accordo ai criteri descritti nei paragrafi successivi.

L'interpretazione delle prove è finalizzata, oltre che a classificare i materiali, a determinare:

- lo stato iniziale;
- i parametri di resistenza al taglio;
- i parametri di deformabilità;
- i coefficienti di permeabilità.

5.3.2 Classificazione dei materiali

La classificazione dei terreni a grana fine verrà effettuata facendo riferimento ai risultati delle prove di laboratorio in termini di:

- fusi granulometrici;
- limiti di Atterberg (limite liquido e limite plastico);
- pesi di volume naturale e secco;
- grado di saturazione;
- contenuti d'acqua naturale;
- indice dei vuoti iniziale.

Una classificazione dei materiali è stata effettuata anche sulla base delle prove **CPT**. In particolare, per l'interpretazione di queste prove si segue il criterio di Robertson (2015). Con questo approccio è possibile classificare i terreni attraversati dalla punta penetrometrica sulla base del valore assunto dal parametro I_c , calcolato a partire dai valori normalizzati di resistenza alla punta (Q_{tn}) e *friction ratio* (F_r); i risultati sono rappresentati in termini di "classe di comportamento del terreno" (SBT, *Soil Behaviour Type*) al fine di ricavare indicazioni sul comportamento meccanico in sito del terreno.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

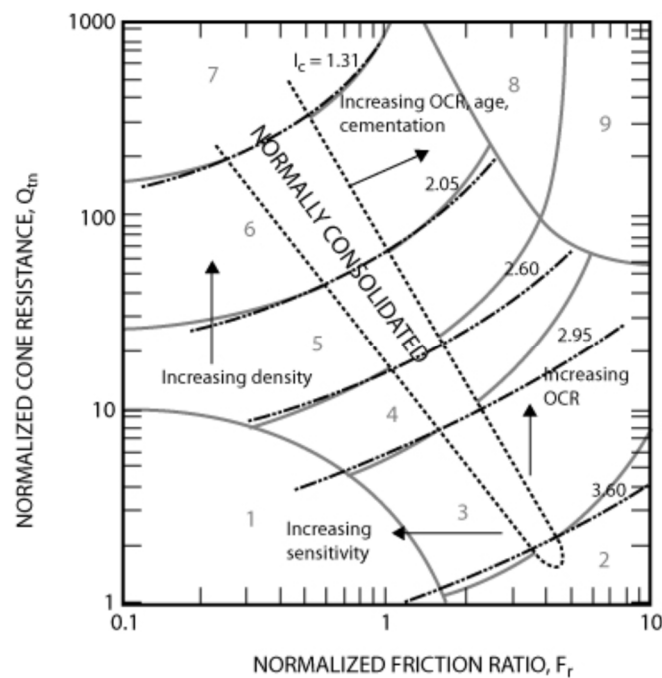


Figura 7: Carta SBT in funzione dei valori normalizzati (Robertson, 2015)

Zone	Soil Behavior Type	I_c
1	Sensitive, fine grained	N/A
2	Organic soils – clay	> 3.6
3	Clays – silty clay to clay	2.95 – 3.6
4	Silt mixtures – clayey silt to silty clay	2.60 – 2.95
5	Sand mixtures – silty sand to sandy silt	2.05 – 2.6
6	Sands – clean sand to silty sand	1.31 – 2.05
7	Gravelly sand to dense sand	< 1.31
8	Very stiff sand to clayey sand*	N/A
9	Very stiff, fine grained*	N/A

Tabella 8: Tabella del range di valori di I_c per l'identificazione del SBT (Robertson, 2015)

Un metodo grafico più immediato è quello di riportare i valori di I_c in funzione della profondità indicando le zone che indentificano i vari SBT (vedi grafici seguenti).

A partire dai dati di campagna che forniscono la resistenza alla punta e di attrito laterale, sono quindi stati calcolati:

- la resistenza alla punta normalizzata $Q_{tn} = \frac{(q_t - \sigma_{v0})}{\sigma'_{v0}}$ (adimensionale)
- il rapporto di attrito (friction ratio) normalizzato $F_r = \frac{f_s}{(q_t - \sigma_{v0})} \times 100$ (%)
- l'indice di materiale $I_c = \sqrt{(3.47 - \log Q_{tn})^2 + (\log F_r + 1.22)^2}$

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

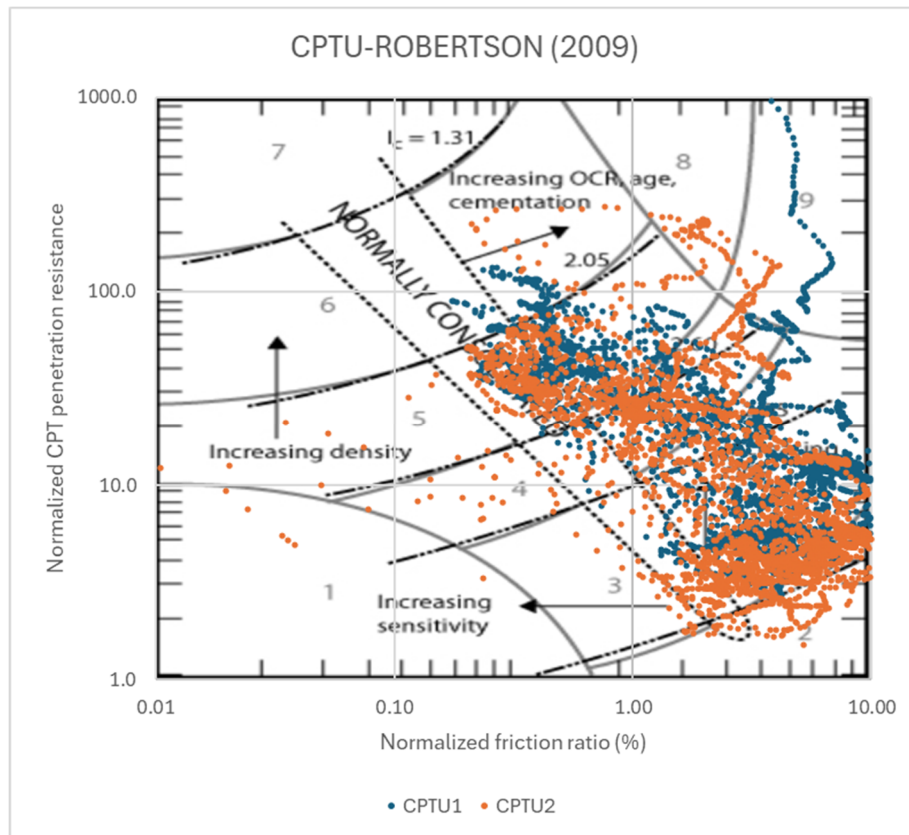


Figura 8: Carta SBT ottenuta dalle prove CPTu 1 e CPTu2

Dal grafico sopra riportato si nota come per entrambe le prove CPTu i materiali ricadano principalmente nelle zone 3, 4 e 5, ovvero variano tra:

- argille limose e argille;
- limo argilloso e argilla limosa;
- sabbia limosa e limo sabbioso.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

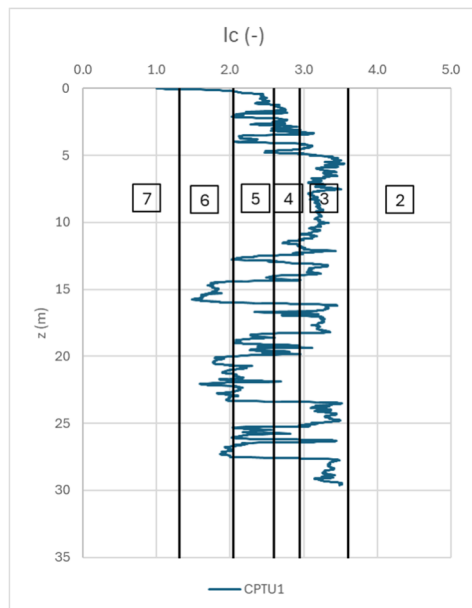


Figura 9: Valori dell'indice di materiale da prova CPTu1

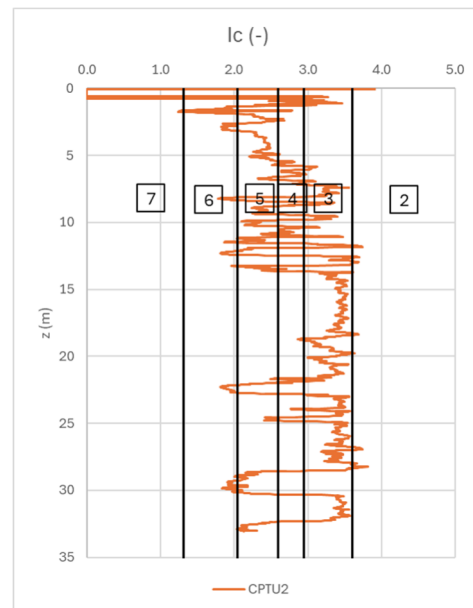


Figura 10: Valori dell'indice di materiale da prova CPTu2

Per la prova CPTu1 si nota come fino a circa 5m l'indice di materiale si attesta nelle zone da 4 a 5, indicative di sabbie limose e limi sabbiosi, mentre da 5 a 12m circa risulta nella zona 3 indicativa di argille limose. Successivamente l'indice di materiale oscilla tra le zone 3, 4 e 5, indicando così una continua alternanza tra argille, limi e sabbie.

Per la prova CPTu2 si nota come fino a circa 14m l'indice di materiale varia nelle zone da 4 a 5, indicative di sabbie limose e limi sabbiosi, mentre oltre i 14m di profondità l'indice risulta più o meno costante nella zona 3 indicativa di argille limose, con solamente alcuni livelli nella zona 4 e 5.

Nel capitolo di caratterizzazione, laddove l'indice di materiale risulti superiore a 2.6, la prova CPT è stata utilizzata per caratterizzare le unità coesive, in particolare per determinare la resistenza al taglio non drenata. Laddove invece l'indice di materiale risulti inferiore a 2.6, la prova CPT è stata utilizzata per caratterizzare le unità incoerenti, in particolare per stimare lo stato di addensamento e l'angolo di attrito.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

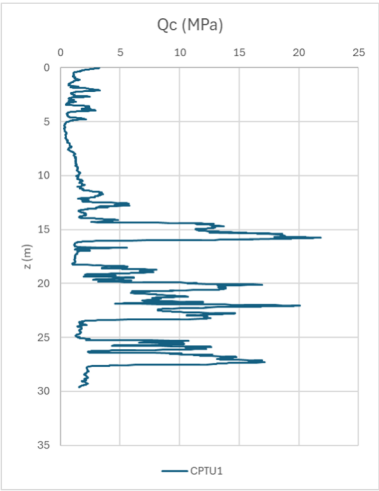


Figura 11: Valori della resistenza alla punta da prova CPTu1

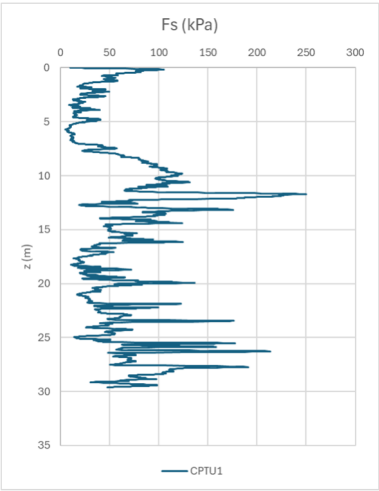


Figura 12: Valori di attrito laterale da prova CPTu1

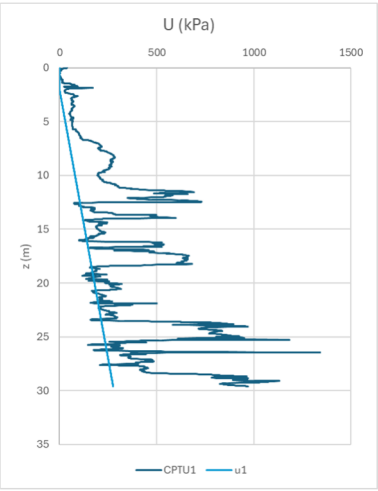


Figura 13: Valori di pressione interstiziale da prova CPTu1

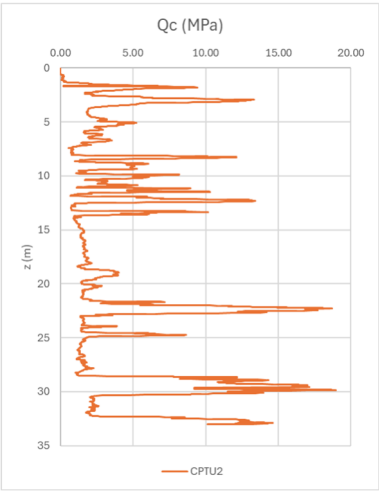


Figura 14: Valori della resistenza alla punta da prova CPTu2

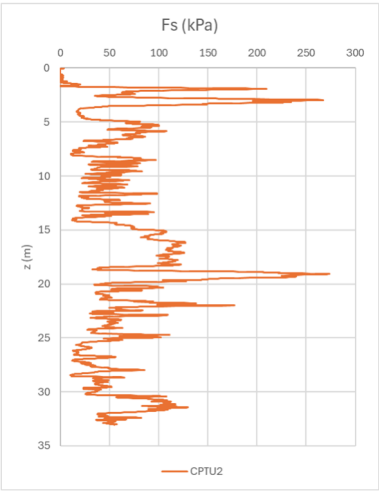


Figura 15: Valori di attrito laterale da prova CPTu2

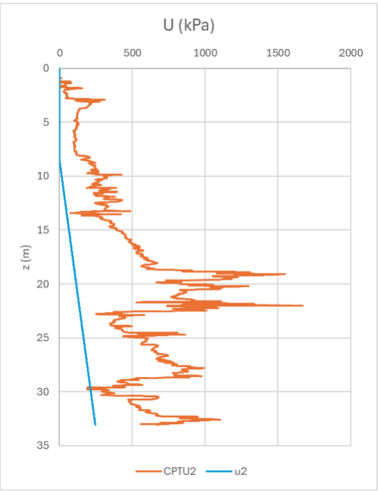


Figura 16: Valori di pressione interstiziale da prova CPTu2

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

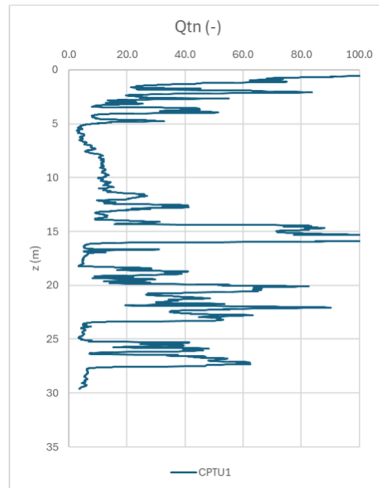


Figura 17: Valori della resistenza alla punta normalizzata da prova CPTu1

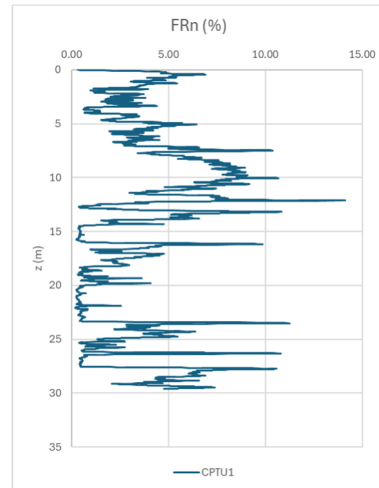


Figura 18: Valori del rapporto di attrito normalizzato da prova CPTu1

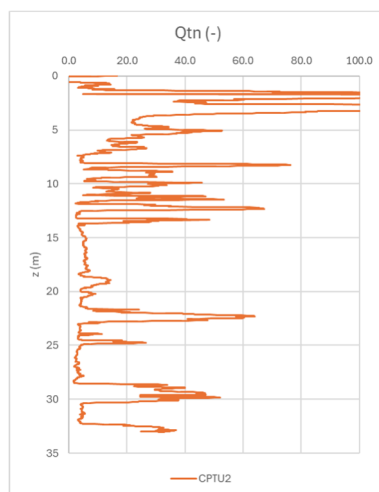


Figura 19: Valori della resistenza alla punta normalizzata da prova CPTu2

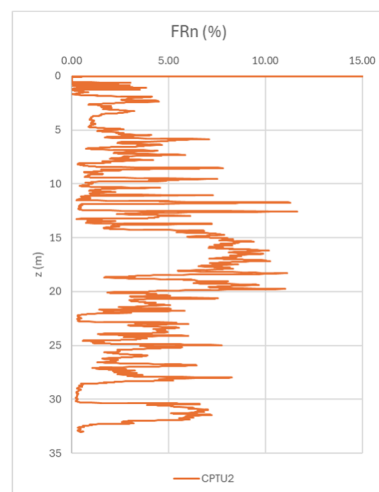


Figura 20: Valori del rapporto di attrito normalizzato da prova CPTu2

5.3.3 Stato tensionale iniziale

La valutazione dello stato tensionale iniziale verrà fatta sulla base:

- di quanto desumibile dagli studi di carattere geologico;
- dell'interpretazione delle prove edometriche di laboratorio;
- delle prove CPT secondo la seguente equazione (Robertson, 2009):

$$OCR = 0.25 * Q_{tn}^{1.25}$$

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

In particolare, nel caso dei materiali a grana fine saturi sotto falda, lo stato tensionale in sito sarà stimato sulla base dei risultati in termini di grado di sovraconsolidazione (OCR oppure $GSC = \sigma_{vmax}' / \sigma_{v0}'$), essendo σ_{vmax}' la pressione di preconsolidazione desumibile dalle prove edometriche con la nota costruzione di Casagrande e σ_{v0}' la pressione verticale efficace geostatica.

Il coefficiente di spinta del terreno a riposo k_0 sarà stimato sulla base della seguente espressione:

$$k_0 = (1 - \sin \varphi) \cdot \sqrt{GSC}$$

essendo:

φ = angolo di resistenza al taglio.

5.3.4 Resistenza al taglio non drenata

La resistenza al taglio non drenata c_u di materiali saturi sotto falda è normalmente valutata con riferimento sia ai risultati delle prove di laboratorio sia all'interpretazione delle prove penetrometriche statiche e dinamiche SPT.

Ove appropriato, i risultati ottenuti saranno commentati anche sulla base del confronto con quelli ottenibili dagli indici di resistenza "pocket penetrometer" registrati sui campioni prelevati.

Come noto la resistenza al taglio non drenata è funzione delle tensioni efficaci di consolidazione e del percorso di carico; in questa sede, in assenza di prove specifiche di laboratorio, si farà riferimento a correlazioni empiriche per l'interpretazione delle prove SPT che forniscono valori di c_u corrispondenti a tensioni efficaci di consolidazione pari a quelle geostatiche e a percorsi di carico caratteristici di prove triassiali di compressione e carico.

Da prove SPT

Relativamente alla prova SPT, si riportano le correlazioni utilizzate come riferimento per la determinazione della resistenza al taglio non drenata c_u :

Terzaghi & Peck	$c_u = \alpha \cdot N_{SPT}$	Con $\alpha = 6.7$
Stroud-Clayton		Con $\alpha = 4.5 \div 5.5$

Da prove CPT

La correlazione tra resistenza penetrometrica (resistenza alla punta q_t) e resistenza a taglio non drenata per terreni argillosi (s_u) può essere espressa dalla relazione

$$s_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_{kt}}$$

con N_{kt} coefficiente adimensionale molto variabile (v. figura successiva tratta da Teh, 1987). Nel caso in esame, N_{kt} è stato calcolato tramite la relazione di Robertson (2012), ovvero:

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

$$N_{kt} = 10.5 + 7 \cdot \log(F_r)$$

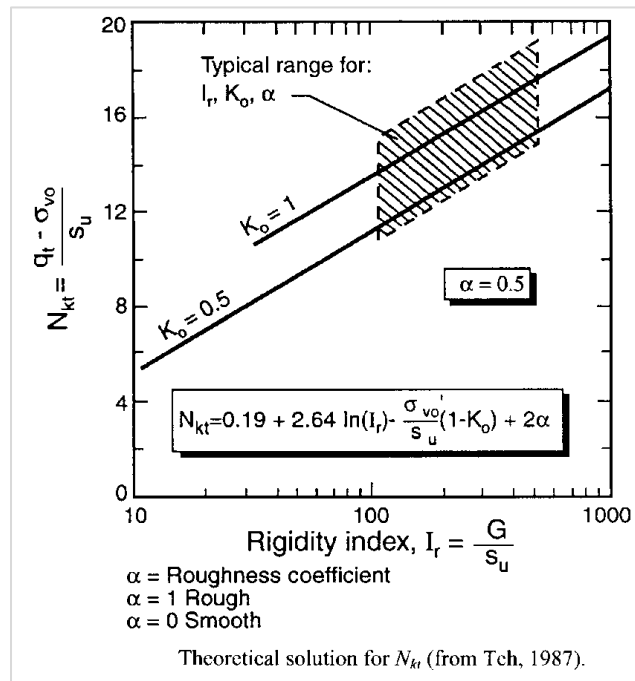


Figura 21: Valore di N_{kt} per la stima della coesione non drenata

5.3.5 Caratteristiche di resistenza al taglio in termini di sforzi efficaci

I parametri di resistenza di picco in termini di sforzi efficaci verranno determinati sulla base dei risultati delle prove di laboratorio di taglio diretto (TD).

5.3.6 Caratteristiche di deformabilità

Per modulo elastico iniziale e modulo elastico operativo valgono le stesse considerazioni esposte per i terreni a grana grossa.

Molti Autori suggeriscono di stimare il modulo non drenato E_u attraverso la correlazione empirica con la coesione non drenata (c_u).

$$E_u = n \cdot c_u$$

stimando quindi prima il valore della coesione non drenata da prove di laboratorio o da prove penetrometriche statiche come descritto in precedenza.

La costante n dipende dal livello di sollecitazione di taglio, dal grado di sovraconsolidazione, dalla sensitività delle argille e da altri fattori (Ladd, 1977). Poiché il comportamento del terreno non è lineare, la scelta del livello di tensione di taglio è molto importante.

Nella figura seguente si illustrano i dati ricavati da Ladd (1977) per terreni normalconsolidati che mostrano la variazione del rapporto E_u/c_u con il livello di tensione per vari tipi di argille ($15 < I_p < 75$).

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

Nella stessa figura si mostra la variazione di E_u/c_u con il grado di sovraconsolidazione OCR in corrispondenza di due livelli di tensione per lo stesso tipo di terreno. La stima dell'indice di plasticità porta a significativi miglioramenti della stima.

Nei casi in esame, per i valori di I_p che caratterizzano i materiali argillosi interessati dalle principali opere, una stima del valore di n tra 600 e 800 appare la più realistica.

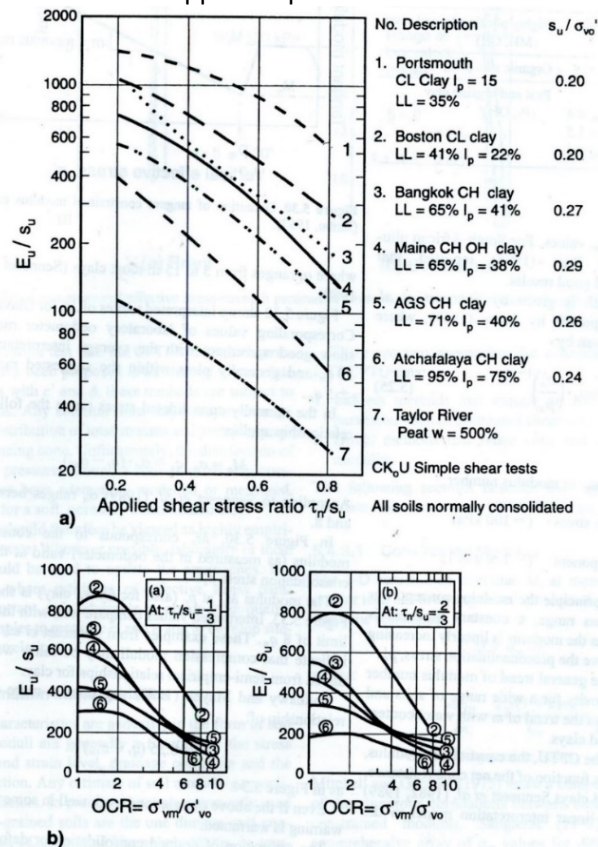


Figure 5.35 Stiffness ratio, E_u/s_u , as function of I_p (adapted from Ladd *et al.*, 1977).

Figura 22: Rapporto di rigidità E_u/s_u in funzione di I_p (da Ladd, 1977 adattato in Lunne-Robertson)

5.3.7 Coefficienti di permeabilità e di consolidazione primaria e secondaria

I coefficienti di permeabilità k sono stimati in base alla descrizione litologica in accordo con quanto indicato in Tabella 7 e da prove CPT come indicato al capitolo 5.2.5.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

6.1 Unità rilevato esistente

Le indagini pregresse hanno evidenziato la presenza di materiale da rilevato, utilizzato per la costruzione del vecchio ponte su entrambe le sponde del fiume. Il materiale risulta costituito da sabbia limosa, su sponda destra risulta misto ad argilla limosa e laterizi. I

Figura 23 mostra i valori di N_{SPT} riferiti a questa unità. I valori si attestano tra 7 e 10 fino a 6m di profondità, mentre per profondità superiori è stata eseguita una sola prova che fornisce un valore di circa 22 (a 8 m circa).

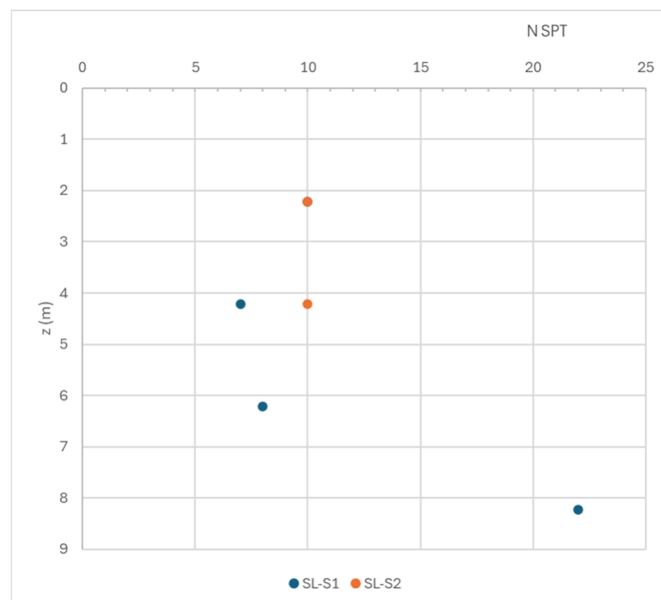


Figura 23: Valori di N_{SPT} relativi all'unità rilevato

6.1.1 Proprietà fisiche

Per la determinazione di peso di volume γ , peso di volume secco γ_d , contenuto d'acqua, limiti di Atterberg e curve granulometriche sono stati considerati i campioni riassunti in Tabella 9.

Si nota come per alcuni campioni, evidenziati in rosso, la componente fine sia dominante rispetto alla componente granulare.

Unità rilevato												
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G (%)	S (%)	L (%)	A (%)
S1	Cl1	3.3	17.3	15.4	12	27	18	9	0	58	32	11

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

	CR1	6.2				21	16	5	0	58	31	12
	CI2	9.3	19.2	16.6	16	36	21	15	2	34	44	20
S2	CI1	3.3	16.2	14.1	15	26	18	8	0	45	39	17

Tabella 9: Campioni considerati per la determinazione delle proprietà fisiche relative all'unità rilevato

Peso di volume e peso di volume secco variano tra 16 e 19.2 kN/m³ e tra 14 e 16.6 kN/m³ rispettivamente. Per il materiale in esame si ritiene rappresentativo un peso di volume nel range 17 – 19 kN/m³.

I risultati delle analisi granulometriche sono riassunti tramite curve granulometriche, riportate in Figura 24. Dalle granulometrie il materiale risulta generalmente classificabile come sabbia limosa/limo sabbioso.

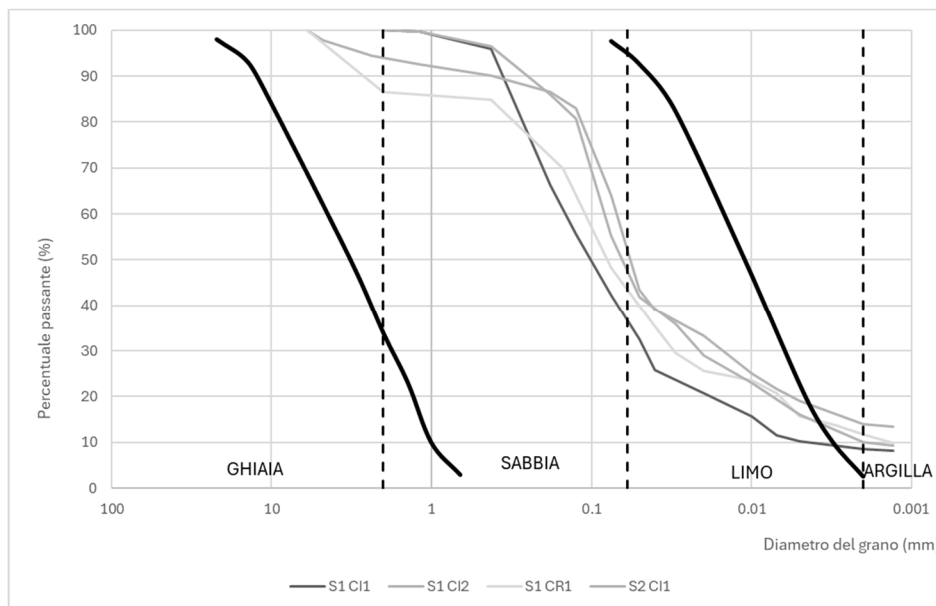


Figura 24: Curve granulometriche relative all'unità rilevato

6.1.2 Stato iniziale del deposito

I valori della densità relativa sono stati determinati tramite correlazioni con SPT e CPT secondo quanto visto nel capitolo 5.2.2. I risultati si attestano principalmente tra il 30% e il 60%, sono riassunti in Figura 25 e risultano indicativi di un materiale mediamente addensato.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

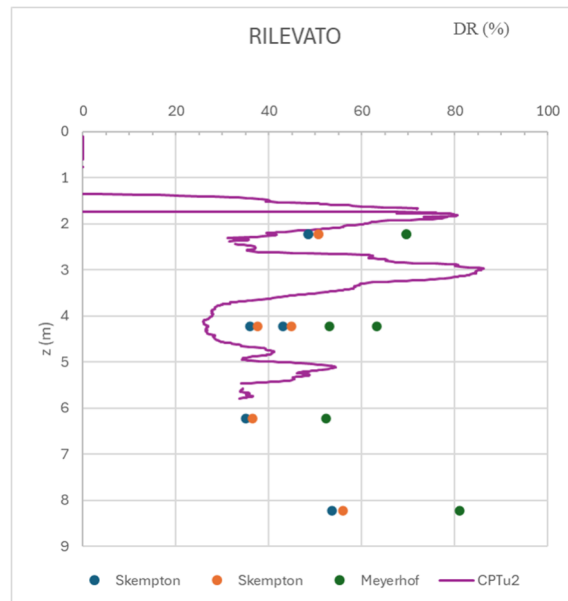


Figura 25: Stato iniziale del deposito, unità rilevato

6.1.3 Caratteristiche di resistenza

Le caratteristiche di resistenza in condizioni drenate sono state determinate tramite correlazioni SPT e CPT (secondo quanto visto al capitolo 5.2.3) e tramite prove di taglio diretto (angolo di attrito e coesione efficace). I valori ottenuti da prove SPT si attestano principalmente nel range 30°-34°, mentre i valori ottenuti da prove CPT risultano leggermente più alti. Non risultano presenti tendenze con la profondità.

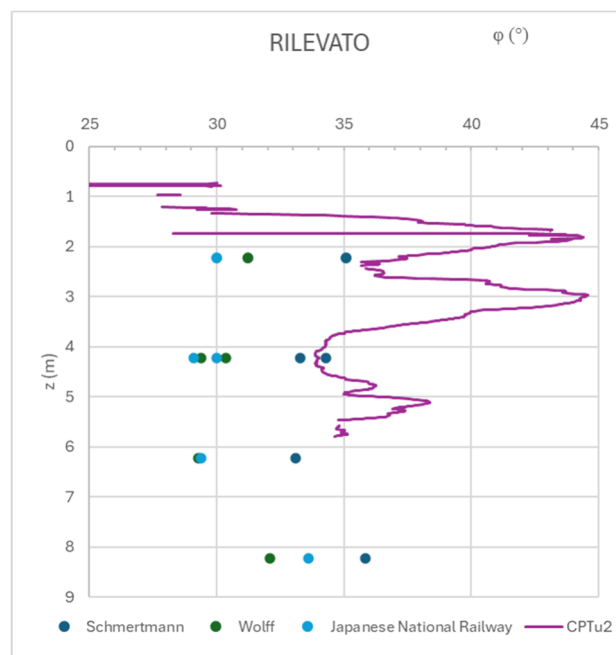


Figura 26: Valori dell'angolo di attrito relativo all'unità rilevato

Sono state eseguite anche alcune prove di taglio diretto, riassunte in Tabella 10.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

Unità rilevato					
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	Tipo prova	c' (kPa)	φ (°)
S1	CI1	3.3	TD	9.3	27.8
	CI2	9.3	TD	18.7	21.6
S2	CI1	3.3	TD	6.3	25.1

Tabella 10: Risultati delle prove di taglio diretto, unità rilevato

I risultati delle prove di taglio diretto sono riportati nello stesso grafico come mostrato in Figura 27. La retta che interpola linearmente i risultati delle prove nel grafico σ - τ è così definita:

$$y = ax + b$$

$$\varphi' = \arctan(a) ; c' = b$$

L'involuppo medio del criterio di resistenza di Mohr-Coulomb fornisce i seguenti valori: coesione efficace $c' = 11$ kPa e angolo d'attrito $\phi' = 25^\circ$;

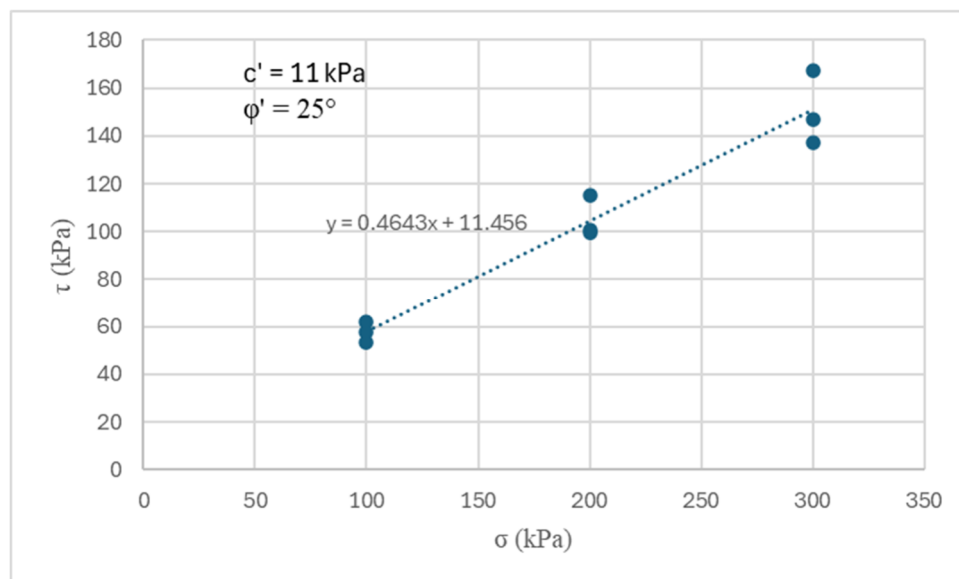


Figura 27: Interpretazione delle prove di taglio diretto relative all'unità rilevato

I valori di coesione e angolo di attrito in funzione della profondità ottenuti da prove TD sono riportati in Figura 28 e Figura 29.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

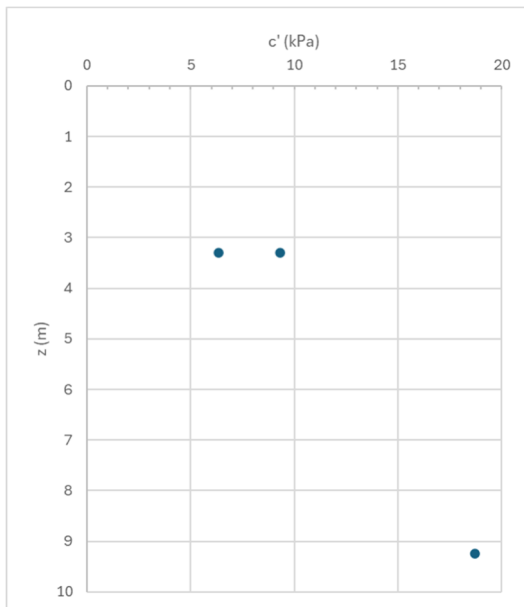


Figura 28: Valori della coesione drenata in funzione della profondità, unità rilevato

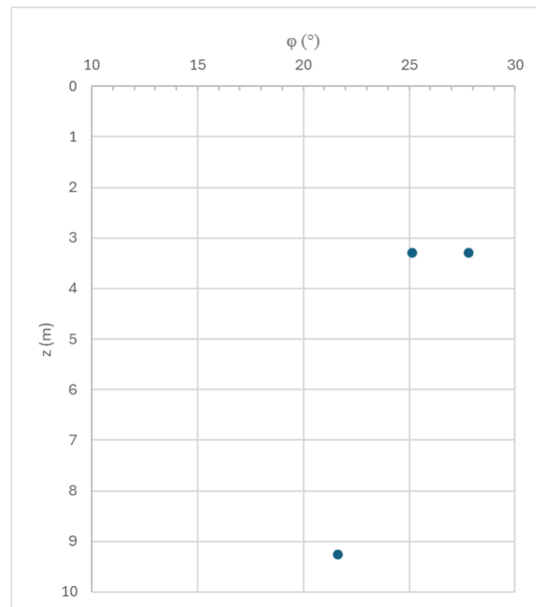


Figura 29: Valori dell'angolo di attrito efficace in funzione della profondità, unità rilevato

Considerando i risultati di tutte le prove, ovvero prove SPT, prove CPT e prove di taglio diretto, range realistici di coesione drenata e angolo d'attrito efficace per l'unità rilevato sono:

- Coesione efficace: 0 – 5 kPa;
- Angolo d'attrito efficace: 28 – 32°.

6.1.4 Caratteristiche di deformabilità

6.1.4.1 Modulo elastico a basse deformazioni

I valori dei moduli a basse deformazioni sono stati ottenuti dai valori di G_0 derivanti dai valori di V_s , a loro volta ricavati preferenzialmente da prove geofisiche. I valori di V_s sono mostrati in Figura 30 mentre i valori del modulo a basse deformazioni sono mostrati in Figura 31.

I valori di E_0 , ricavati da G_0 (vedi paragrafo 5.2.4), risultano nel range 80 – 200 MPa su sponda destra e leggermente più alti nel range 180 – 300 MPa su sponda sinistra.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

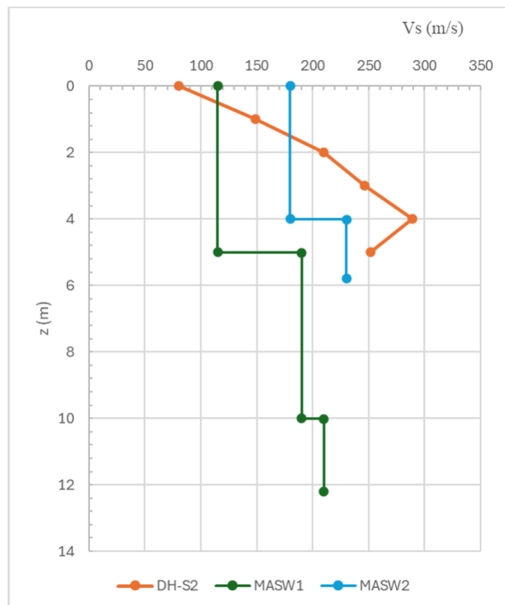


Figura 30: Valori della velocità delle onde V_s da prove geofisiche

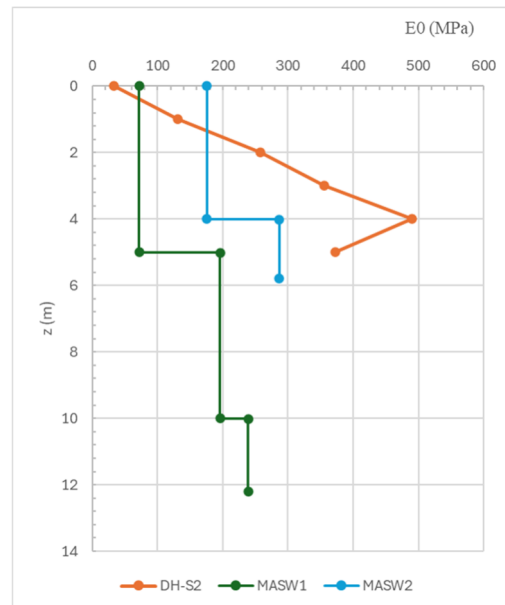


Figura 31: Valori del modulo elastico E_0 da prove geofisiche

6.1.4.2 Modulo elastico operativo

I valori del modulo elastico operativo sono stati stimati tramite correlazioni con SPT e tramite prove geofisiche.

Per quanto riguarda le prove SPT sono state utilizzate le correlazioni viste nel capitolo 5.2.4. I valori ottenuti sono plottati in Figura 32. Si specifica che i valori ottenuti dalle prove geofisiche presentati nel grafico sono stati determinati come $1/10$ di E_0 , poiché mostrano una buona correlazione con i dati derivati dalle prove SPT. Questi valori sono da utilizzare per il calcolo dei rilevati, mentre per calcoli riguardanti le fondazioni si suggerisce di utilizzare i valori del modulo elastico operativo calcolato come $1/5$ di E_0 .

I parametri di deformabilità, riportati nel grafico seguente, risultano nel range 8 – 20 MPa su sponda destra e leggermente più alti nel range 18 – 30 MPa su sponda sinistra.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

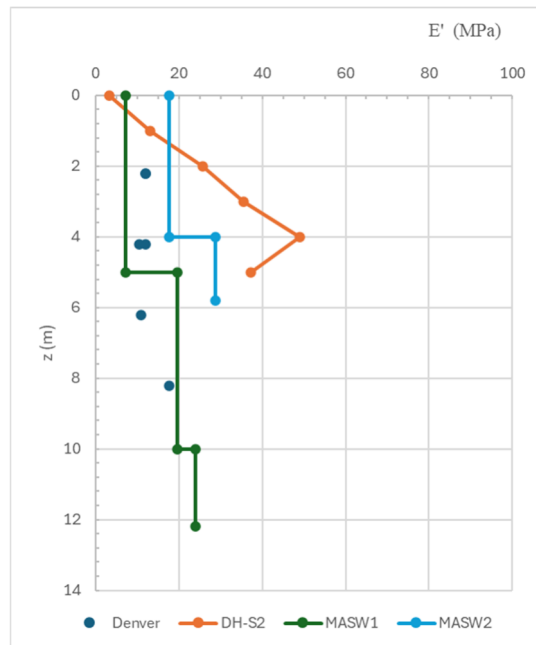


Figura 32: Valori del modulo elastico operativo ($1/10$ di E_0) da prove SPT e prove geofisiche

6.1.4.3 Parametri edometrici

Tramite alcune prove edometriche sono state ricavati i parametri edometrici, riassunti in Tabella 11. I moduli edometrici riassunti in tabella e mostrati graficamente in Figura 33 sono stimati per lo stato tensionale corrispondente alla profondità di prelievo dei campioni. I valori del modulo edometrico mostrano un leggero aumento con la profondità.

Si ritiene che i moduli edometrici ricavati siano sottostimati rispetto ai moduli stimati da prove in situ, e che ciò può essere dovuto a fattori di disturbo durante il campionamento o alle differenze significative tra provini sottoposti a prove di laboratorio e al comportamento atteso in situ.

Unità rilevato							
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	e_0	OCR	C_c	C_s	M (MPa)
S1	CI1	3.2	0.71	2.3	0.184	0.019	4.0
	CI2	9.1	0.60	1.3	0.188	0.027	6.0
S2	CI1	3.1	0.89	1.4	0.211	0.020	2.0

Tabella 11: Risultati delle prove edometriche

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

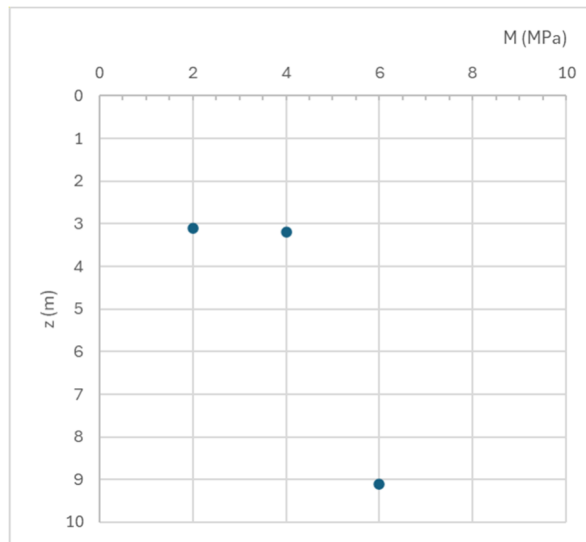


Figura 33: Valori del modulo edometrico

6.1.5 Caratteristiche di permeabilità

Il coefficiente di permeabilità è stato stimato secondo quanto visto al paragrafo 5.2.5. I risultati delle prove CPT sono riassunti in Figura 34 e risultano principalmente nel range $10^{-7} - 10^{-5}$ m/s.

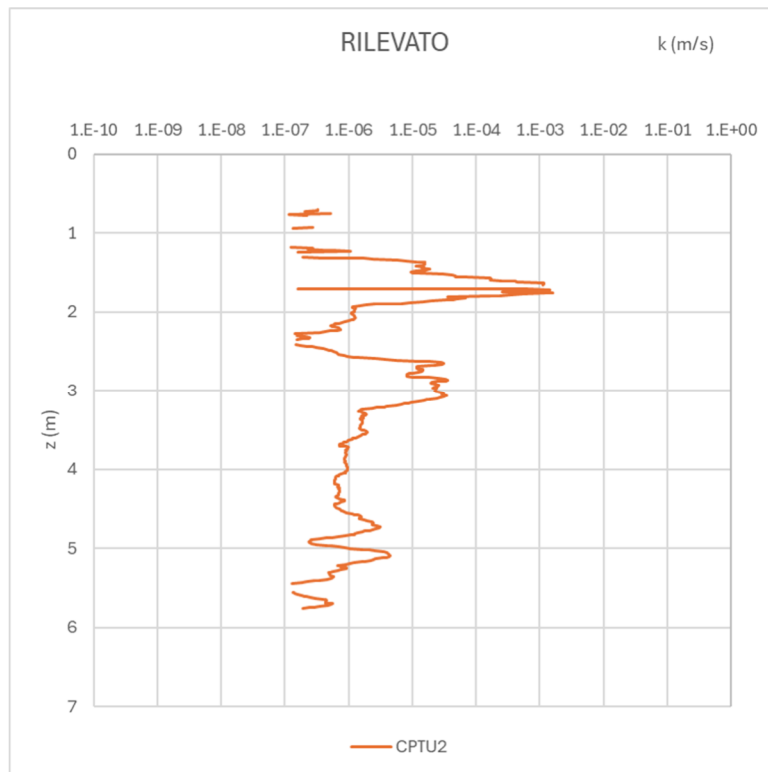


Figura 34: Valori del coefficiente di permeabilità, unità rilevato

6.1.6 Sintesi dei parametri geotecnici

I range dei parametri geotecnici dell'unità rilevato sono riassunti in Tabella 12.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

Unità rilevato esistente						
γ (kN/m ³)	c' (kPa)	φ (°)	E_0 (MPa)	$E' (1/10 E_0)$ (MPa)	$E' (1/5 E_0)$ (MPa)	k (m/s)
17 – 19	0 – 5	28 – 32	80 – 300	8 – 30	16 – 60	$10^{-7} - 10^{-5}$

Tabella 12: Sintesi dei parametri geotecnici per l'unità rilevato esistente

6.2 Unità incoerenti (Sabbie limose, sabbie e ghiaia)

Le indagini pregresse hanno evidenziato la presenza di sabbia limosa e di sabbia e ghiaia su entrambe le sponde del fiume. I livelli di sabbia limosa risultano estesi sia verticalmente che orizzontalmente, mentre risulta presente un unico livello di sabbia e ghiaia di spessore circa 2.7m sulla sponda destra (sondaggio S1) e di spessore circa 0.9m sulla sponda sinistra (sondaggio S2). Sono quindi state distinte due unità geotecniche incoerenti, che verranno trattate di seguito, ovvero:

- Sabbia limosa (SL), mista a limo sabbioso, da scarsamente a mediamente addensata;
- Sabbia e ghiaia (SG), con ghiaia del diametro 2-5 cm e sabbia grossolana.

Figura 35 mostra i valori di N_{SPT} riferiti alle unità incoerenti. Per l'unità di sabbia limosa (SL) si nota un chiaro aumento con la profondità, da valori di circa 10 nei primi 7m di profondità, fino a valori di circa 25 a 30m di profondità. Per l'unità di sabbia e ghiaia (SG) si nota come i valori si attestino a circa 33 e siano circoscritti ad un unico livello a circa 14 – 18m di profondità.

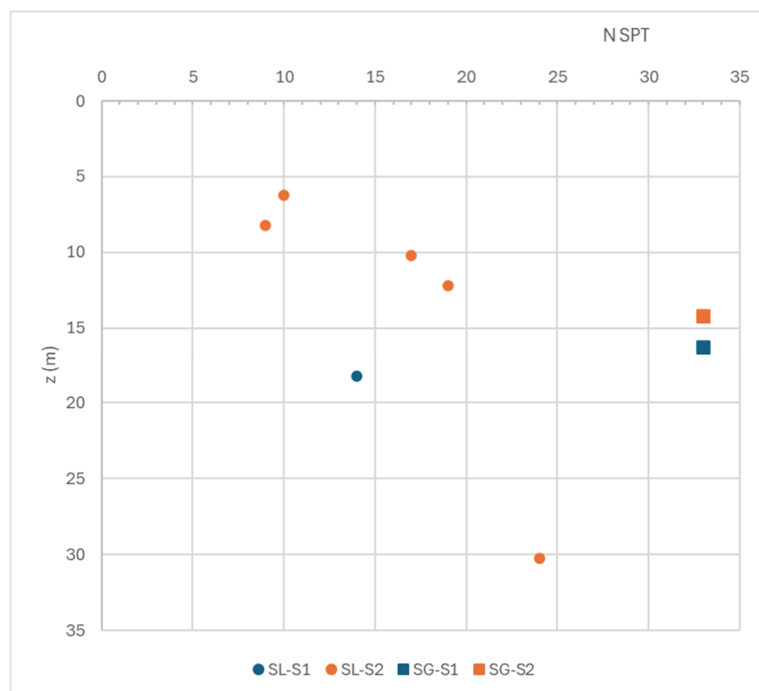


Figura 35: Valori di N_{SPT} relativi alle unità incoerenti

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

6.2.1 Proprietà fisiche

Sono stati considerati i campioni riassunti in Tabella 13, sui quali sono state eseguite solamente le analisi granulometriche.

Unità incoerenti												
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G (%)	S (%)	L (%)	A (%)
S1	CR2	20.2							6	66	20	8
	CR3	28.2							0	91	7	2
S2	CI2	9.3							0	66	24	10
	CR1	14.2							24	67	6	2
	CI3	15.3							4	68	15	13

Tabella 13: Campioni considerati per la determinazione delle proprietà fisiche delle unità incoerenti

Non risultano dunque presenti campioni utili per la definizione del peso di volume. Per le unità incoerenti si ritiene rappresentativo un peso di volume nel range 18 – 20 kN/m³.

I risultati delle analisi granulometriche riferite alle unità incoerenti sono riassunti tramite curve granulometriche, riportate in Figura 36. Dalle granulometrie il materiale risulta generalmente classificabile come sabbia limosa, talvolta con ghiaia.

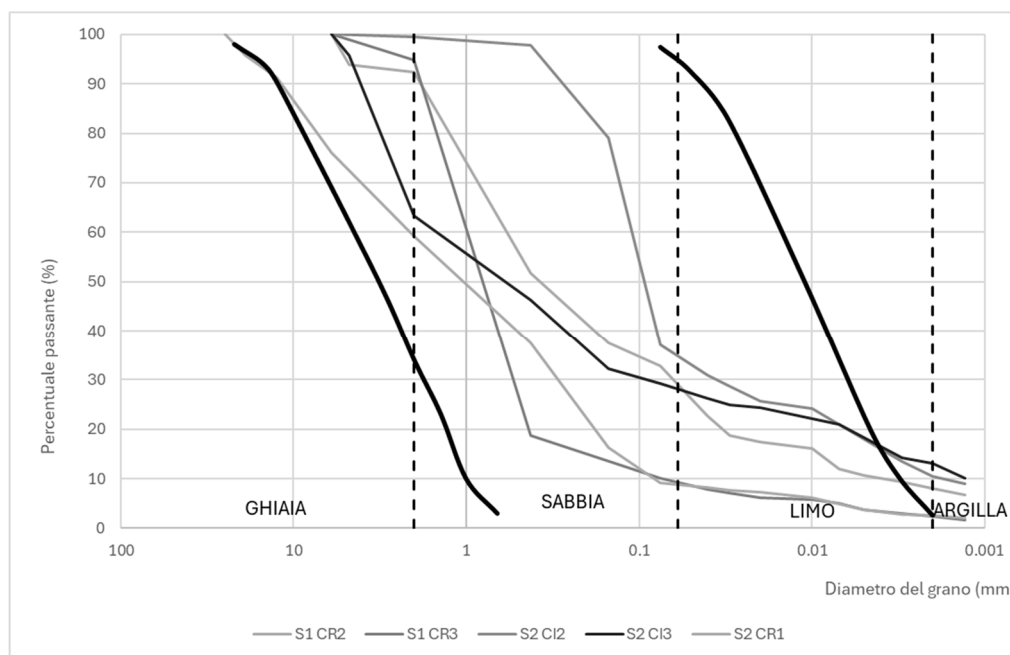


Figura 36: Curve granulometriche relative alle unità incoerenti

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

6.2.2 Stato iniziale del deposito

I valori della densità relativa sono stati determinati tramite correlazioni con SPT e CPT secondo quanto visto nel capitolo 5.2.2. I risultati si attestano principalmente tra il 40% e il 70%, sono riassunti in Figura 37 e risultano indicativi di un materiale mediamente addensato.

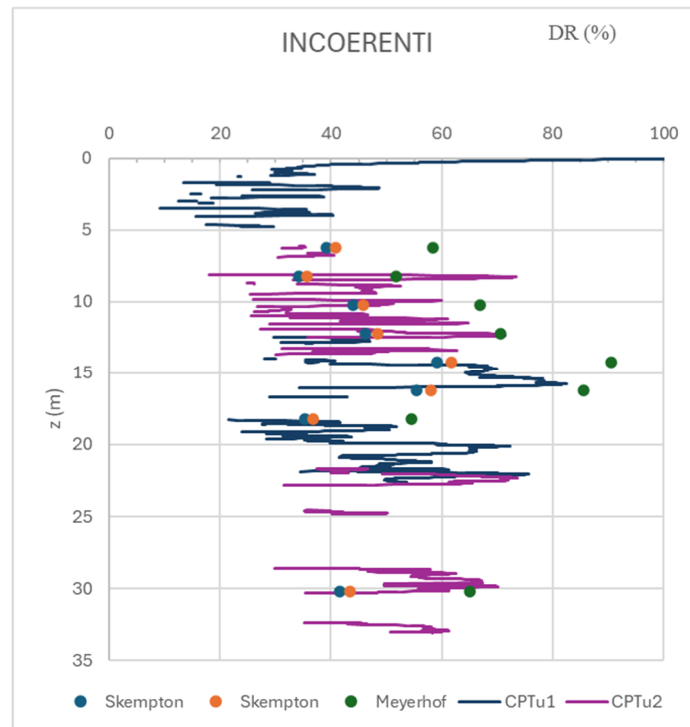


Figura 37: Stato iniziale del deposito, unità incoerenti

6.2.3 Caratteristiche di resistenza

Le caratteristiche di resistenza in condizioni drenate sono state determinate tramite correlazioni SPT e CPT (secondo quanto visto al capitolo 5.2.3). I valori ottenuti da prove SPT e CPT si attestano principalmente nel range 30°-36° senza mostrare alcuna tendenza con la profondità. Risulta evidente però come tra circa 14 – 18m di profondità sia i valori da SPT che da CPT siano leggermente più alti, ovvero in corrispondenza dello strato di sabbia e ghiaia. Pertanto, si assumono i seguenti range di variazione:

- Sabbia limosa (SL): angolo d'attrito tra 30 – 34°;
- Sabbia e ghiaia (SG): angolo d'attrito tra 32 – 36°.

Data la natura incoerente del materiale, per l'unità sabbia limosa si assume un range di coesione 0 – 5 kPa, mentre si assume coesione nulla per l'unità sabbia e ghiaia.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

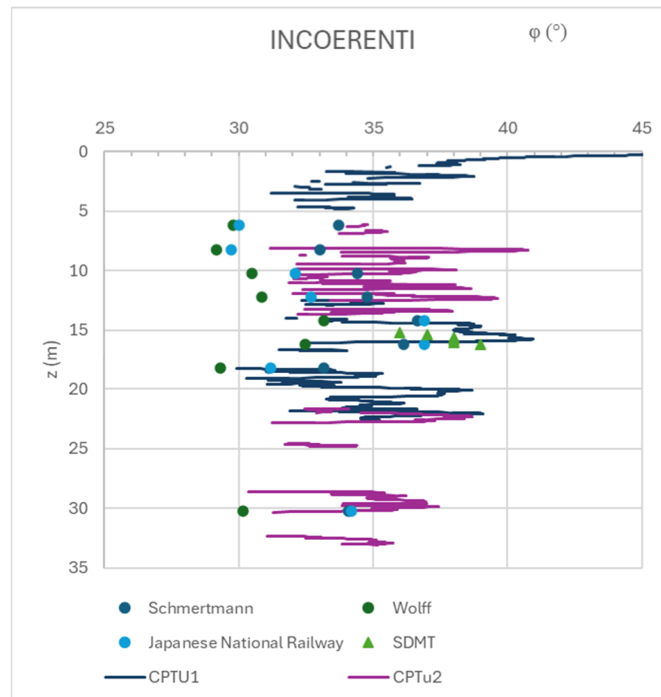


Figura 38: Valori dell'angolo di attrito relativo alle unità incoerenti

6.2.4 Caratteristiche di deformabilità

6.2.4.1 Modulo elastico a basse deformazioni

I valori dei moduli a basse deformazioni sono stati ottenuti dai valori di G_0 derivanti dai valori di V_s , a loro volta ricavati preferenzialmente da prove geofisiche. I valori di V_s sono mostrati in Figura 39 mentre i valori del modulo a basse deformazioni sono mostrati in Figura 40.

I valori di E_0 , ricavati da G_0 (vedi paragrafo 5.2.4), mostrano un aumento con la profondità, in particolare:

- Sponda destra:
 - Fino a 20m di profondità risultano nel range 200 – 300 MPa;
- Sponda sinistra:
 - Fino a 20m di profondità risultano nel range 200 – 400 MPa;
 - Oltre i 28m di profondità risultano nel range 350 – 600 MPa.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

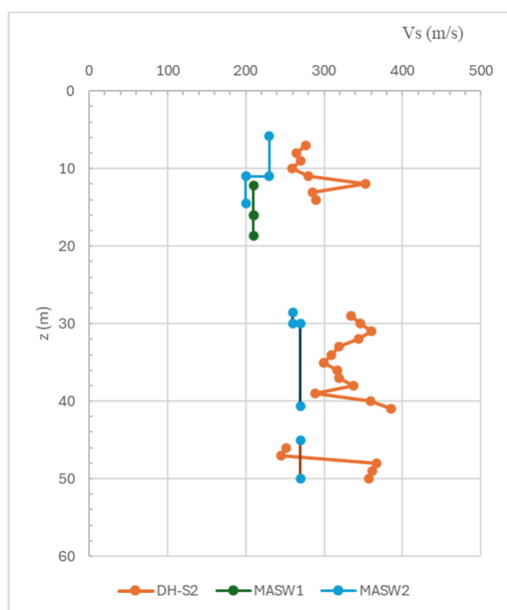


Figura 39: Valori della velocità delle onde V_s da prove geofisiche e dilatometro sismico

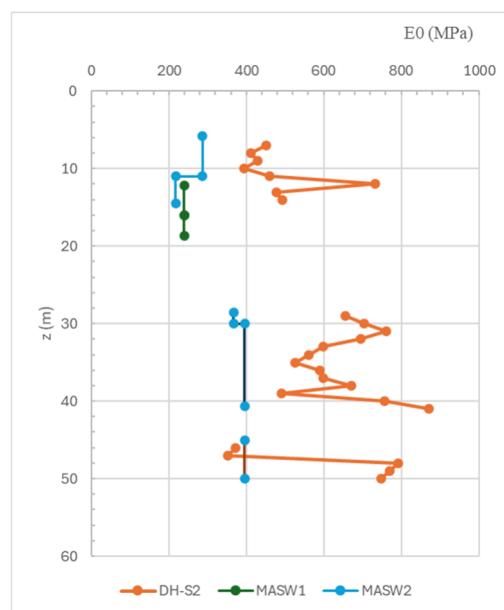


Figura 40: Valori del modulo elastico E_0 da prove geofisiche e dilatometro sismico

6.2.4.2 Modulo elastico operativo

I valori del modulo elastico operativo sono stati stimati tramite correlazioni con SPT, tramite prove geofisiche e tramite dilatometro sismico.

Per quanto riguarda le prove SPT sono state utilizzate le correlazioni viste nel capitolo 5.2.4. I valori ottenuti sono plottati in Figura 41. Si specifica che i valori ottenuti dalle prove geofisiche presentati nel grafico sono stati determinati come $1/10$ di E_0 , poiché mostrano una buona correlazione con i dati derivati dalle prove SPT e dalla prova eseguita col dilatometro. Questi valori sono da utilizzare per il calcolo dei rilevati, mentre per calcoli riguardanti le fondazioni si suggerisce di utilizzare i valori del modulo elastico operativo calcolato come $1/5$ di E_0 .

I parametri di deformabilità riportati nel grafico seguente mostrano un chiaro aumento con la profondità, in particolare:

- Fino a 20m di profondità risultano nel range 20 – 40 MPa;
- Oltre i 28m di profondità risultano nel range 35 – 60 MPa.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

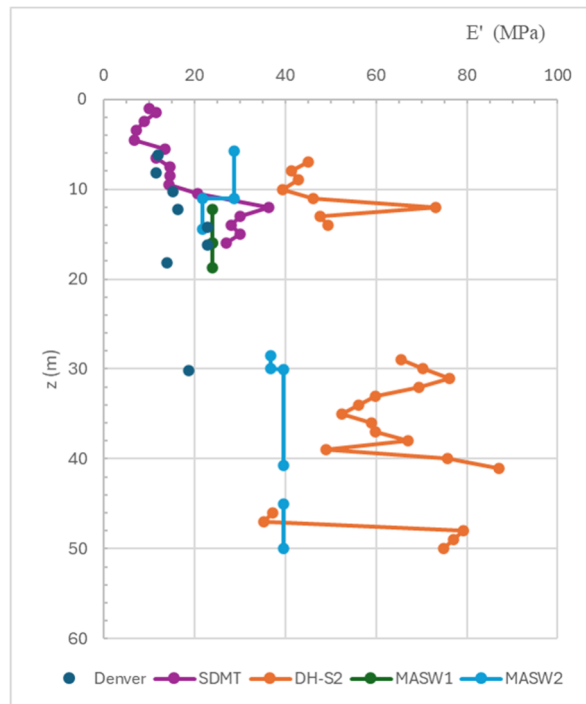


Figura 41: Valori del modulo elastico operativo (1/10 di E_0) da prove SPT, prove geofisiche e da prova con dilatometro sismico

6.2.5 Caratteristiche di permeabilità

Il coefficiente di permeabilità è stato stimato secondo quanto visto al paragrafo 5.2.5. I risultati delle prove CPT sono riassunti in Figura 42 e risultano principalmente nel range $10^{-7} - 10^{-5}$ m/s.

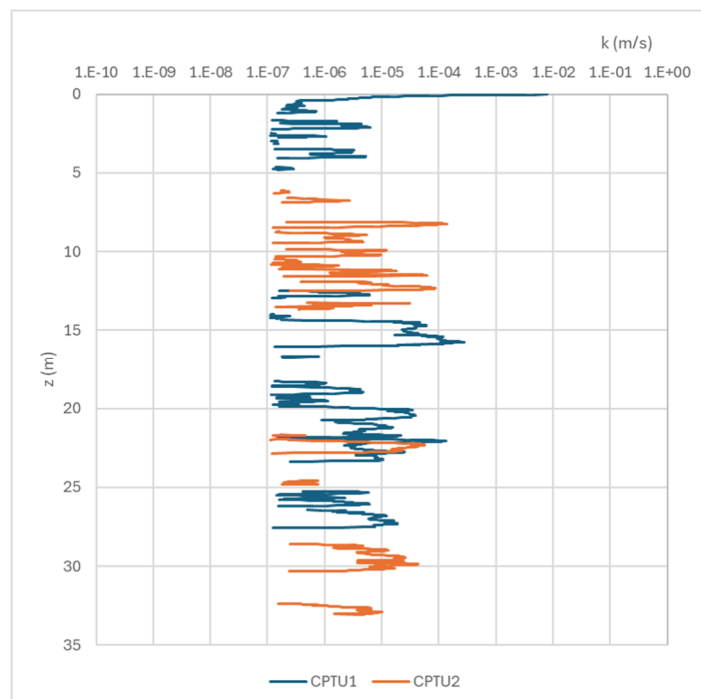


Figura 42: Valori del coefficiente di permeabilità, unità incoerenti

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

6.2.6 Sintesi dei parametri geotecnici

I range dei parametri geotecnici delle unità incoerenti sono riassunti in Tabella 14.

Unità incoerenti								
Unità	z (m)	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	E ₀ (MPa)	E' (1/10 E ₀) (MPa)	E' (1/5 E ₀) (MPa)	k (m/s)
SL	<20	18 – 20	0 – 5	30 – 34	200 – 400	20 – 40	40 – 80	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵
	>28				350 – 600	35 – 60	70 – 120	
SG	-	18 – 20	0	32 – 36	200 – 400	20 – 40	40 – 80	

Tabella 14: Sintesi dei parametri geotecnici per le unità incoerenti

6.3 Unità coesive

Le indagini pregresse hanno evidenziato la presenza di unità coesive quali argilla limosa, limo argilloso e limo sabbioso su entrambe le sponde del fiume. Tuttavia, le analisi granulometriche eseguite sui campioni estratti hanno rilevato solamente la presenza di limi sabbiosi debolmente argillosi, mentre non si dispongono di evidenze per quanto riguarda la presenza di argilla limosa. Verrà dunque eseguita un'unica caratterizzazione, valida per tutte le eventuali unità geotecniche coesive presenti.

Figura 43 mostra i valori di N_{SPT} riferiti alle unità coesive. Si nota un chiaro aumento con la profondità, da valori di circa 10 a 20m di profondità, fino a valori di circa 25 a 35m di profondità.

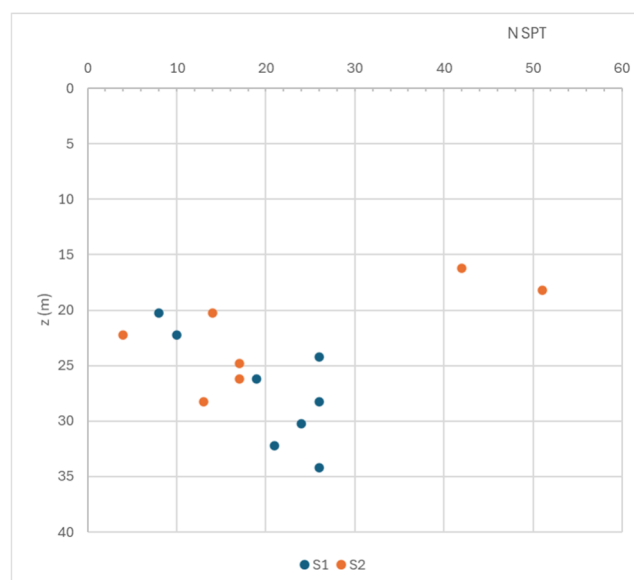


Figura 43: Valori di N_{SPT} relativi alle unità coesive

6.3.1 Proprietà fisiche

Per la determinazione di peso di volume γ , peso di volume secco γ_d , contenuto d'acqua, limiti di Atterberg e curve granulometriche sono stati considerati i campioni riassunti in Tabella 15.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

Unità coesive												
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	w (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	G (%)	S (%)	L (%)	A (%)
S1	CI3	15.3	19.6	15.5	26	31	26	5	0	32	49	19
	CI4	24.3				28	20	8	0	41	46	13
	CR4	32.2				28	18	10	0	10	66	23
S2	CR2	20.2				39	21	18	0	10	60	30
	CI4	24.3				20	-	-	0	39	46	14
	CR3	28.2				28	20	8	0	29	47	21

Tabella 15: Campioni considerati per la determinazione delle proprietà fisiche delle unità coesive

Peso di volume e peso di volume secco si attestano a circa 19.6 e 15.5 kN/m³ rispettivamente. Per la formazione in esame si ritiene rappresentativo un peso di volume nel range 18 – 20 kN/m³.

I risultati delle analisi granulometriche riferite alle unità coesive sono riassunti tramite curve granulometriche, riportate in Figura 44. Dalle granulometrie il materiale risulta generalmente classificabile come limo sabbioso debolmente argilloso.

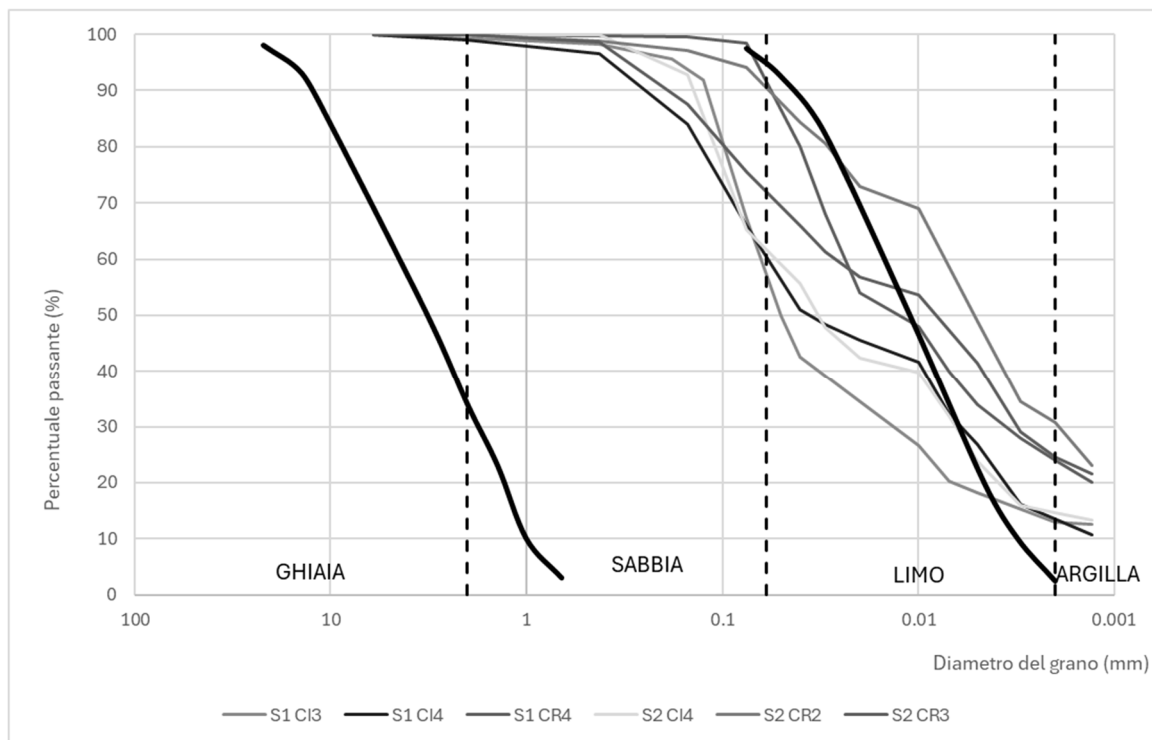


Figura 44: Curve granulometriche relative alle unità coesive

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

I limiti di Atterberg sono stati determinati in laboratorio e sono plottati in Figura 45 sulla carta di plasticità di Casagrande. I campioni risultano cadere nel campo delle argille inorganiche di medio-bassa plasticità (CL).

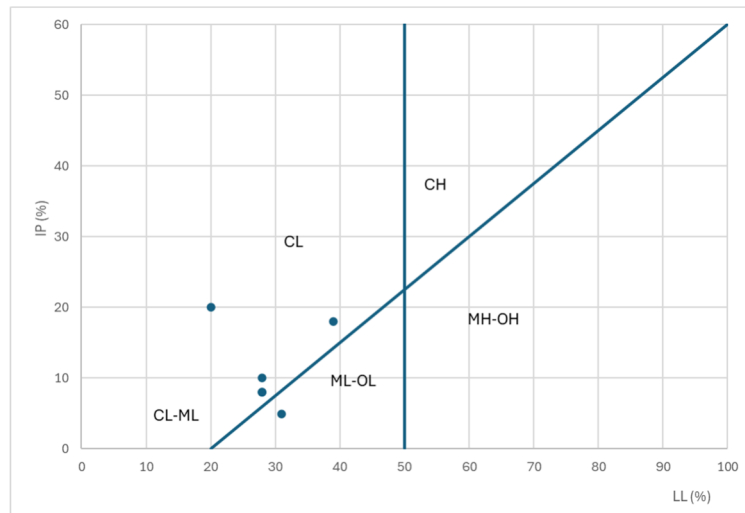


Figura 45: Carta di plasticità di Casagrande

6.3.2 Stato tensionale iniziale

È stata eseguita una prova edometrica, che ha permesso di determinare il valore del grado di sovraconsolidazione. Esso risulta pari a circa 1.4 a 15m di profondità. Il grado di sovraconsolidazione è stato determinato anche tramite le prove CPT secondo quanto visto al capitolo 5.3.3. La figura seguente ne mostra i risultati. Si nota una leggera tendenza con la profondità, con valori intorno a 2 – 3 fino a circa 20m, e valori più bassi intorno a 1.5 più in profondità. I dati CPT risultano dunque abbastanza coerenti con quanto determinato dalla prova edometrica.

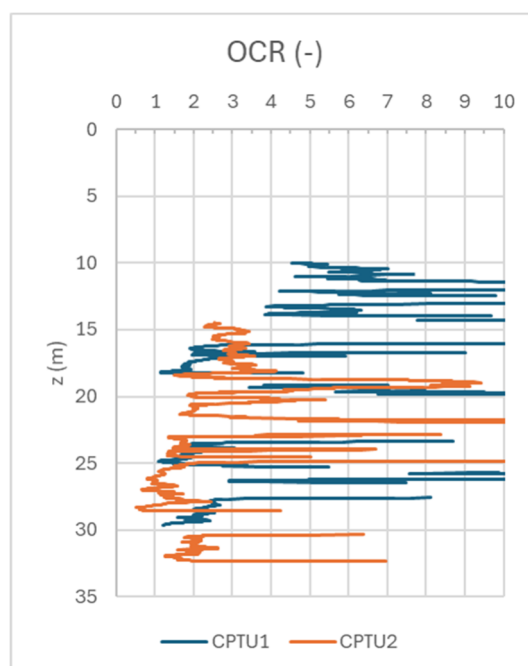


Figura 46: Valori del grado di sovraconsolidazione da prove CPT

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

6.3.3 Caratteristiche di resistenza

6.3.3.1 Condizioni non drenate

I valori di resistenza al taglio non drenata sono stati stimati tramite le correlazioni viste nel capitolo 5.3.4, sia da prove SPT (Terzaghi-Peck) che da prove CPT. I valori ottenuti sono riassunti in Figura 47 per la sponda destra e in Figura 48 per la sponda sinistra. Per la definizione dei range è stato dato maggior peso alle prove CPT, che risultano di migliore affidabilità rispetto alle correlazioni da prove SPT per terreni coesivi. I valori variano nei seguenti range:

- Sponda destra: 70 – 170 kPa, con andamento generale (indicato in figura dalla linea tratteggiata nera) pari a:
 - $z < 19\text{m}$: $c_u = 70 \text{ kPa}$;
 - $z > 19\text{m}$: $c_u = 70 + 7.33 \cdot (z - 19) \text{ kPa}$
- Sponda sinistra: 50 – 130 kPa, con andamento generale (indicato in figura dalla linea tratteggiata nera) pari a:
 - $z > 15\text{m}$: $c_u = 50 + 5 \cdot (z - 15) \text{ kPa}$

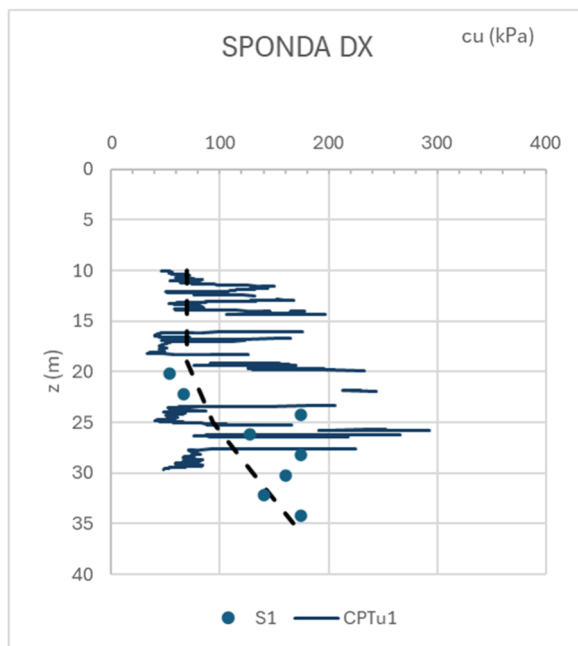


Figura 47: Valori della resistenza al taglio non drenata, unità coesiva, sponda destra

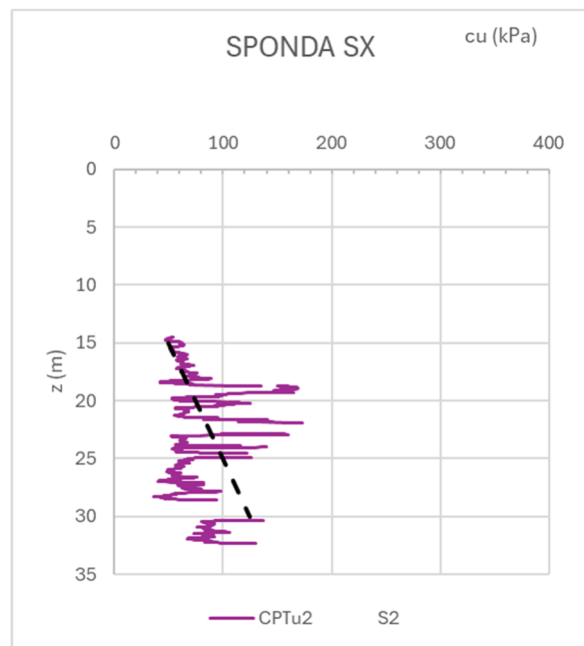


Figura 48: Valori della resistenza al taglio non drenata, unità coesiva, sponda sinistra

6.3.3.2 Condizioni drenate

Per la determinazione delle caratteristiche in condizioni drenate è stata eseguita una prova di taglio diretto riassunta in Tabella 16.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

Unità coesive					
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	Tipo prova	c' (kPa)	ϕ (°)
S1	CI3	15.3	TD	18.2	26.4

Tabella 16: Risultati delle prove di taglio diretto, unità coesive

Considerando i risultati, range realistici di coesione drenata e angolo d'attrito efficace per le unità coerenti sono:

- Coesione efficace: 10 – 20 kPa;
- Angolo d'attrito efficace: 22 – 26°.

6.3.4 Caratteristiche di deformabilità

6.3.4.1 Modulo elastico a basse deformazioni

I valori dei moduli a basse deformazioni sono stati ottenuti dai valori di G_0 derivanti dai valori di V_s , a loro volta ricavati preferenzialmente da prove geofisiche. I valori di V_s sono mostrati in Figura 49 mentre i valori del modulo a basse deformazioni sono mostrati in Figura 50.

I valori di E_0 , ricavati da G_0 (vedi paragrafo 5.2.4), mostrano un chiaro aumento con la profondità, in particolare:

- Fino a 20m di profondità risultano nel range 200 – 300 MPa;
- Oltre i 20m di profondità risultano nel range 300 – 400 MPa.

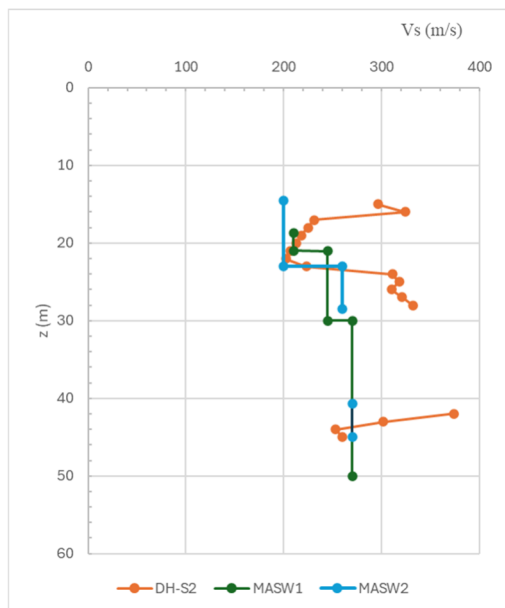


Figura 49: Valori della velocità delle onde V_s da prove geofisiche e dilatometro sismico

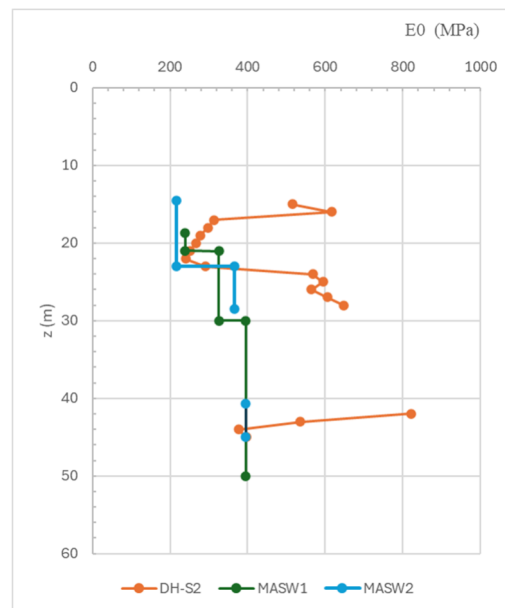


Figura 50: Valori del modulo elastico E_0 da prove geofisiche e dilatometro sismico

6.3.4.2 Modulo elastico operativo

I valori del modulo elastico operativo per le unità coesive sono stati stimati tramite prove geofisiche.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

Si specifica che i valori ottenuti dalle prove geofisiche presentati nel grafico sono stati determinati come $1/10$ di E_0 . Questi valori sono da utilizzare per il calcolo dei rilevati, mentre per calcoli riguardanti le fondazioni si suggerisce di utilizzare i valori del modulo elastico operativo calcolato come $1/5$ di E_0 .

I parametri di deformabilità riportati nel grafico seguente mostrano un chiaro aumento con la profondità, in particolare:

- Fino a 20m di profondità risultano nel range 20 – 30 MPa;
- Oltre i 20m di profondità risultano nel range 30 – 40 MPa.

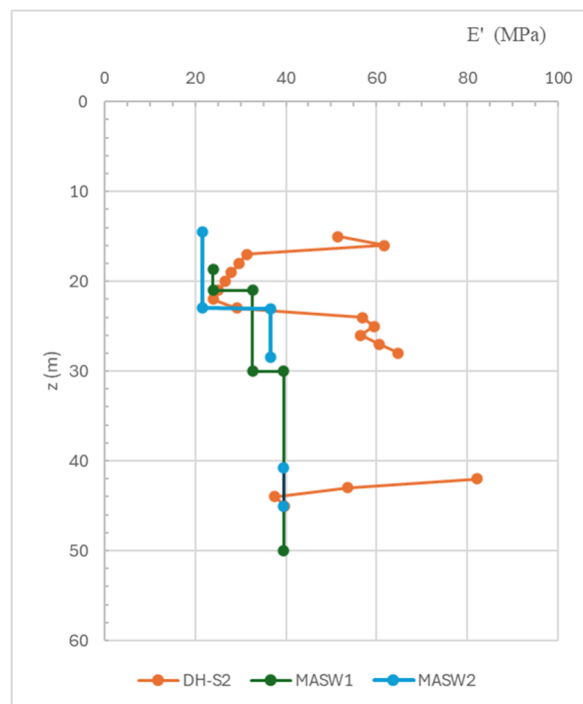


Figura 51: Valori del modulo elastico operativo ($1/10$ di E_0) da prove geofisiche

6.3.4.3 Parametri edometrici

È stata eseguita una prova edometrica, i cui risultati sono riassunti in Tabella 17. I moduli edometrici riassunti in tabella sono stimati per lo stato tensionale corrispondente alla profondità di prelievo dei campioni.

Si ritiene che i moduli edometrici ricavati siano sottostimati rispetto ai moduli stimati da prove in situ, e che ciò può essere dovuto a fattori di disturbo durante il campionamento o alle differenze significative tra provini sottoposti a prove di laboratorio e al comportamento atteso in sito.

Unità coesive							
Sondaggio	Campione	Profondità media (m)	e_0	OCR	C_c	C_s	M (MPa)
S1	Cl3	15.3	0.72	1.4	0.146	0.018	17.0

Tabella 17: Risultati delle prove edometriche

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

6.3.5 Caratteristiche di permeabilità

Il coefficiente di permeabilità è stato stimato secondo quanto visto al paragrafo 5.3.7. I risultati delle prove CPT sono riassunti in Figura 52 e risultano principalmente nel range $10^{-9} - 10^{-7}$ m/s.

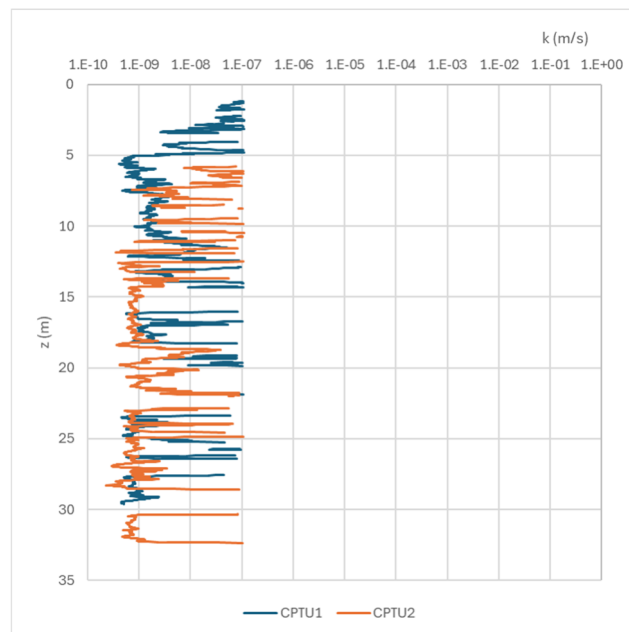


Figura 52: Valori del coefficiente di permeabilità, unità coesive

6.3.6 Sintesi dei parametri geotecnici

I range dei parametri geotecnici delle unità coesive sono riassunti in Tabella 18.

Unità coesive								
z (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	c' (kPa)	φ (°)	E_0 (MPa)	$E' (1/10 E_0)$ (MPa)	$E' (1/5 E_0)$ (MPa)	k (m/s)
< 20	18 – 20	Sponda DX: 70 – 170	10 – 20	22 – 26	200 – 300	20 – 30	40 – 60	$10^{-9} - 10^{-7}$
> 20		Sponda SX: 50 – 130			300 – 400	30 – 40	60 – 80	

Tabella 18: Sintesi dei parametri geotecnici per le unità coesive

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

7. MODELLO GEOTECNICO

Nei paragrafi seguenti si riporta lo schema stratigrafico con l'individuazione delle unità geotecniche individuate in accordo ai criteri esposti in precedenza e secondo quanto riportato nel profilo geologico, ovvero:

- Unità rilevato esistente, costituita dal materiale utilizzato per la costruzione del rilevato relativo al vecchio ponte;
- Unità incoerenti: sabbia limosa (SL) e sabbia e ghiaia (SG)
- Unità coesive: limo sabbioso (L) e argilla limosa/limo argilloso (AL)

Alle singole unità sono stati assegnati i parametri geotecnici di maggiore interesse per il dimensionamento dell'opera (modello geotecnico) in accordo alla caratterizzazione generale delle singole unità, rivista nel dettaglio sulla base dei risultati delle indagini eseguite nel singolo sito, in modo da ridurre l'ampiezza del range di valori.

Lo schema stratigrafico riportato nelle tabelle seguenti è da ritenersi semplificato e i contatti tra le varie unità sono fornite in profondità (variabili) dal p.c.; per una lettura più accurata dell'andamento dei vari strati si rimanda al profilo geologico, di cui si riporta uno stralcio in Figura 53.

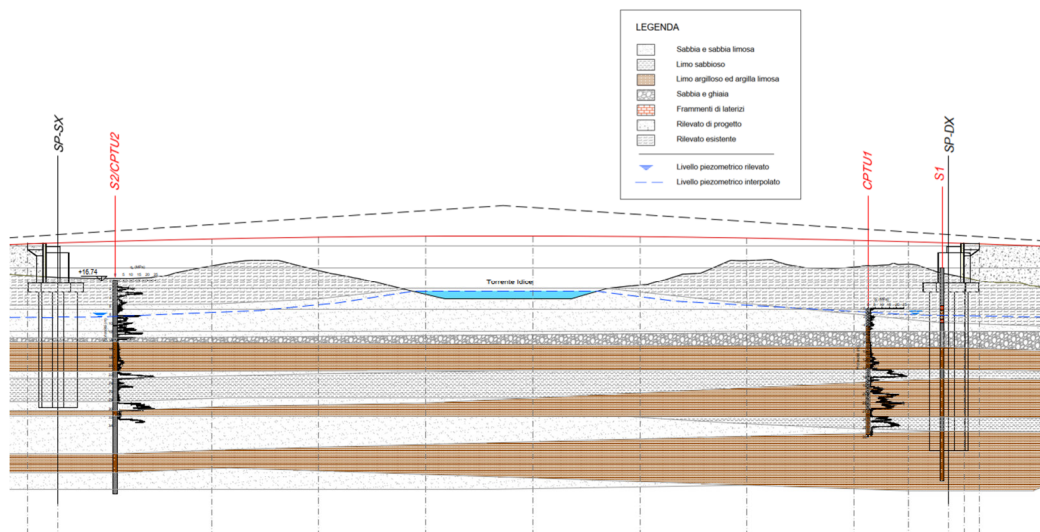


Figura 53: Stralcio del profilo geologico

Nelle tabelle seguenti si riportano i parametri geotecnici di maggiore interesse e di diretto utilizzo per il dimensionamento delle opere. La legenda dei parametri utilizzati è la seguente

- γ = peso di volume naturale;
- ϕ' = angolo di attrito;
- c' = coesione efficace;
- c_u = resistenza al taglio non drenata (solo per materiali coesivi saturi);
- E_0 = modulo elastico iniziale;
- E' = modulo di Young "operativo";
- k = coefficiente di permeabilità.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

7.1 Sponda destra

Lo schema geotecnico, mostrato in Figura 53 e descritto in Tabella 19, è rappresentato da circa 13m di materiale da rilevato, ovvero terreno antropico utilizzato per la costruzione del rilevato del vecchio ponte, essenzialmente costituito da sabbia limosa mista ad argilla limosa e laterizi, circa 3m di sabbia limosa seguita da altri 3m di sabbia e ghiaia, seguito da materiale più fine quale limo argilloso e argilla limosa, talvolta intercalato da limo sabbioso.

Le indagini di riferimento sono: S1, CPTu1, MASW1 e SDMT. La determinazione del livello di falda deriva sia dal piezometro installato nel foro di sondaggio S1, sia dalla prova CPTu1. Come specificato nella relazione geologica, il piezometro ha rilevato la falda ad una profondità di circa 11m, mentre la prova CPTu1 ha rilevato la stessa ad una profondità di circa 2m. Va però considerato che la prova CPTu è stata eseguita ad una quota inferiore rispetto al sondaggio S1, ovvero in una zona non interessata dal rilevato del ponte precedente. Si ritiene che si tratti dunque della stessa falda. Dato che il sondaggio S1 risulta ubicato in corrispondenza delle fondazioni del nuovo ponte, la falda di interesse si considera a circa 11m di profondità. Si segnala tuttavia che si dispone solamente di n.2 misurazioni del livello di falda, eseguite nei mesi di aprile e maggio 2024, dunque non risulta possibile stabilire le variazioni stagionali della falda, probabilmente dominate anche dal livello del torrente Idice. Per la seguente fase progettuale si suggerisce di proseguire con le misurazioni del livello di falda, in modo da poter stabilire le eventuali variazioni stagionali.

La prova di riferimento per la definizione della classe di sottosuolo è la MASW1.

Sponda Destra				
Strato	Profondità da (m)	Profondità a (m)	Unità Geotecnica	Descrizione generale
1	0	13	R	Rilevato esistente: sabbia limosa mista ad argilla limosa e laterizi
2	13	16	SL	Sabbia limosa
3	16	19	SG	Sabbia e ghiaia
4	19	24	LSA	Limo argilloso
5	24	26	LSA	Limo sabbioso
6	26	35	LSA	Limo argilloso
7	35	38	LSA	Limo sabbioso
8	38	50	LSA	Limo argilloso
Quota della falda: +8.6 m s.l.m.				
Categoria di sottosuolo: C				

Tabella 19: Modello geotecnico sponda destra

I parametri geotecnici riferiti alla sponda destra sono riassunti nella Tabella 20.

Sponda destra								
Unità	z (m)	γ (kN/m³)	c _u (kPa)	c' (kPa)	φ (°)	E ₀ (MPa)	E' (MPa)	k (m/s)
R	-	17 – 19	-	0 – 5	28 – 32	80 – 200	8 – 20	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵
SL	<20	18 – 20	-	0 – 5	30 – 34	200 – 300	20 – 30	10 ⁻⁷ – 10 ⁻⁵
SG	-			0	32 – 36			

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25 LIVELLO PROG. PF TIPO DOC. R AMBITO GE PROGRESSIVO 102 REV. r00

LSA	<20	18 – 20	70 – 170	10 – 20	22 – 26	200 – 300	20 – 30	$10^{-9} - 10^{-7}$
	z > 20					300 – 400	30 – 40	

Tabella 20: Parametri geotecnici sponda destra

7.2 Sponda sinistra

Lo schema geotecnico, mostrato in Figura 53 e descritto in Tabella 21, è rappresentato da circa 5.8m di materiale da rilevato, ovvero terreno antropico utilizzato per la costruzione del rilevato del vecchio ponte, essenzialmente costituito da sabbia limosa, seguito da sabbia limosa con varie intercalazioni di strati più fini quali limo argilloso e limo sabbioso.

Le indagini di riferimento sono: S2, CPTu2 e MASW2. Non ci sono piezometri, ma il livello di falda è desumibile dalla prova CPTu2 a circa 8.5m, dato in accordo con quanto determinato lato sponda destra. Le prove di riferimento per la definizione della classe di sottosuolo sono la DownHole eseguita nel foro di sondaggio S2 e la MASW2.

Sponda Sinistra				
Strato	Profondità da (m)	Profondità a (m)	Unità Geotecnica	Descrizione generale
1	0	5.8	R	Rilevato esistente: sabbia limosa mista
2	5.8	14.5	SL	Sabbia limosa
3	14.5	21.4	LSA	Limo argilloso
4	21.4	28.5	LSA	Limo sabbioso
5	28.5	40.7	SL	Sabbia limosa
6	40.7	45	LSA	Limo argilloso
7	45	50	SL	Sabbia limosa
Quota della falda: +8.2 m s.l.m.				
Categoria di sottosuolo: C				

Tabella 21: Modello geotecnico sponda sinistra

I parametri geotecnici riferiti alla sponda sinistra sono riassunti nella Tabella 22.

Sponda sinistra								
Unità	z (m)	γ (kN/m ³)	c_u (kPa)	c' (kPa)	ϕ (°)	E_0 (MPa)	E' (MPa)	k (m/s)
R	-	17 – 19	-	0 – 5	28 – 32	180 – 300	18 – 30	$10^{-7} - 10^{-5}$
SL	z < 20	18 – 20	-	0 – 5	30 – 34	200 – 400	20 – 40	$10^{-7} - 10^{-5}$
	z > 28					350 – 600	35 – 60	
LSA	z < 20	18 – 20	50 – 130	10 – 20	22 – 26	200 – 300	20 – 30	$10^{-9} - 10^{-7}$
	z > 20					300 – 400	30 – 40	

Tabella 22: Parametri geotecnici sponda sinistra

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] Brown E.T., Hoek B. (1978). Trends in relationships between measured In-Situ stresses and depth – Technical Note;
- [2] Hoek E., Brown E.T. (1997), “Practical estimates of rock mass strength”, Intl. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186;
- [3] Hoek E., Carranza-Torres C., Cortum B. (2002), “Hoek-Brown Failure Criterion – 2002 Edition”;
- [4] Hoek E., Diederichs M. S. (2006), “Empirical Estimation of rock mass Modulus”, Intl. J. Rock Mech. & Mining Sciences 43 (2006), 203-215;
- [5] Baldi G., Jamiolkowski M., Lo Presti D.C.F., Manfredini G., Rix G.J. (1989) “Italian experiences in assessing shear wave velocity from CPT and SPT” Earthquake Geotechnical Engineering, Proc. of Discussion Session on Influence of Local Conditions on Seismic Response, 12th Int. Conf. on S.M.F.E., Rio de Janeiro, Brasil, pp. 157-168.
- [6] Balmer G. (1952) “A general analytical solution for Mohr’s envelope” ASTM, 52.
- [7] Berardi R. (1999) “Non linear elastic approaches in foundation design” Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials, Torino, Balkema.
- [8] Berardi R. , Bellingeri P. (1998). “Deformabilità degli ammassi rocciosi da approcci empirici: influenza della qualità del materiale roccioso e dello stato di sforzo in sito” Rivista Italiana di Geotecnica, Vol. 32 (1), Patron Ed., 39-62.
- [9] Bieniawski Z.T. (1978) “Determining rock mass deformability – Experience from case histories! ” Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 15:237-248.
- [10] Bieniawski Z.T. (1989) “Engineering Rock Mass Classifications” New York, John Wiley & Sons. [83]. Bolton (1986) “The strength and dilatancy of sands” Geotechnique 36 , n° 1.
- [11] Brown E.T., Hoek E. (1988) “Discussion on paper n° 20431 by R. Ucae entitled “Determination of shear failure envelope in rock masses” Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 114, n° 3.
- [12] Burland, J.B. (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays. Géotechnique 40, n° 3, 329- 378.
- [13] Byrne P.M., Salgado F.M., Howie J.A. (1990) “Relationship between the unload shear modulus from pressuremeter tests and the maximum shear modulus for sand” Proc. III International Symposium on pressuremeter (ISP3), Oxford, Thomas Telford, London.
- [14] Chandler R.J., de Freitas M.H., Marinos P. (2004) “Geotechnical characterisation of soils and rocks: a geological perspective” Advances in Geotechnical Engineering, The Skempton Conference, 2004, Thomas Telford, London.
- [15] Clayton C.R.I. (1995) “The Standard Penetration Test (SPT): Methods and use” CIRIA Report n° 143, 1995. [89]. Cubrinowski M., Ishihara K. (1999) “Empirical correlation between SPT N-value and relative density for sandy soils” Soils and Foundations, vol. 39, n° 5, pp. 61-71.
- [16] Durgunoglu H.T., Mitchell J.K. (1975) “Static penetration resistance of soils, I -Analyses, II - Evaluation of the theory and interpretation for practice” aSCE Specialty Conference on in Situ Measurements of Soil Properties, Raleigh NC, V.I..
- [17] Elson W.K. (1984) “Design of laterally-loaded piles” CIRIA Report 103.
- [18] Fahey M. (1992) “Shear modulus of cohesionless soil: variation with stress and strain level” Canadian Geotechnical Journal, n°30.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001) PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA												
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	<table><tr><td>CODICE PROGETTO</td><td>LIVELLO PROG.</td><td>TIPO DOC.</td><td>AMBITO</td><td>PROGRESSIVO</td><td>REV.</td></tr><tr><td>24V25</td><td>PF</td><td>R</td><td>GE</td><td>102</td><td>r00</td></tr></table>	CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.	24V25	PF	R	GE	102	r00
CODICE PROGETTO	LIVELLO PROG.	TIPO DOC.	AMBITO	PROGRESSIVO	REV.								
24V25	PF	R	GE	102	r00								

- [19]Fahey M., Carter J.P. (1993) "A finite element study of the pressuremeter test in sand using a nonlinear elastic plastic model" Canadian Geotechnical Journal, n°29.
- [20]Fourmaintraux D. (1976) "Characterization of rocks: laboratory tests". Chapter 4 in "Mècanique des roches appliquée aux ouvrages du génie civil" by M. Panet et al. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- [21]Goodman R.E. (1989) "Introduction to rock mechanics". Second edition, John Wiley & Sons.
- [22]Hoek E., Brown E.T. (1980) "Underground excavations in rock" London, Institution of Mining and Metallurgy.
- [23]Hoek E. (1983) "Strength of jointed rock masses" Géotechnique, 33, n° 3.
- [24]Hoek E., Brown E.T. (1988) "The Hoek-Brown failure criterion – A 1988 update" Proc. of 15th Canadian Rock Mechanics Symposium, Toronto, Canada.
- [25]Hoek E. (1990) "Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion" Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 27.
- [26]Hoek E., Wood D., Shah S. (1992) "A modified Hoek-Brown failure criterions for jointed rock masses" Proc. Int. ISRM Symposium on Rock Characterisation, EUROCK'92, Chester, United Kingdom.
- [27]Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1997) "Support of underground excavations in hard rock" Rotterdam, A.A. Balkema.
- [28]Hoek E., Marinos P., Benissi M. (1998) "Applicability of the Geological Strenght Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses" The Case of Athens Schist Formation, Bull. Engg, Geol, Env. 57(2), 151-160.
- [29]Hoek E., Carranza-Torres C.T., Corkum B. (2002) "Hoek-Brown failure criterion- 2002 edition" Proc. North American Rock Mechanics Society Meeting in Toronto, July.
- [30]Ishihara K., Tsukamoto Y., Shimizu Y. (2001) "Estimate of relative density from in-situ penetration tests" Proceedings In-situ 2001, Bali.
- [31]Jamiolkowski M., Ghionna V.N., Lancellotta R., Pasqualini E. (1988) "New correlations of penetration tests for design practice" Proceedings of I International Symposium on Penetration Testing, ISOPT I, Orlando.
- [32]Ladd C.C., Foot R. (1974) "A new design procedure for stability of soft clays" Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, vol.100, n° 7.
- [33]Ladd C.C., Foot R., Ishihara K., Schlosser F., Poulos H.G. (1977) "Stress deformation and strength characteristics" S.O.A. Report, Proc. IX Int. Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Tokyo, Vol. 2.
- [34]Londe P. (1988) "Discussion on paper n°20431 by R. Ucae entitled "Determination of shear failure envelope in rock masses" Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 114, n° 3.
- [35]Lo Presti D.C.F. (1989) "Proprietà dinamiche dei terreni" Atti delle Conferenze di Geotecnica di Torino, 14th Ciclo, Comportamento dei terreni e delle fondazioni in campo dinamico.
- [36]Marchetti S. (1985) "On the field determination of ko in sand" Discussion Session 2A, 11th ICSMFE, S. Francisco.
- [37]Marinos P., Hoek E. (2000) "GSI: a geologically friendly tool for rock mass strenght estimation" GEO- ENG.
- [38]Matlock, H., Reese, L.C. (1960). "Generalized Solutions for Laterally Loaded Piles". Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, V.86, No.SM5, pp.63-91.

STAZIONE APPALTANTE : Città Metropolitana di Bologna	INTERVENTO DI RIPRISTINO DEL PONTE CROLLATO SU S.P. 6 KM 13 TRA I COMUNI DI BUDRIO E MOLINELLA (CIG: B61D6D1B0D - CUP: C51B23000440001)					
PROGETTAZIONE : SYSTRA S.p.A. (Mandataria) SETECO INGEGNERIA S.r.l. ITEC ENGINEERING S.r.l.	PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICO ECONOMICA					
ELABORATI GENERALI Relazione geotecnica di caratterizzazione	CODICE PROGETTO 24V25	LIVELLO PROG. PF	TIPO DOC. R	AMBITO GE	PROGRESSIVO 102	REV. r00

- [39]Morgenstern N.R. (1990) "Instability mechanisms in stiff soils and weak rocks" Proc. X Southeast Asian Geotechnical Conference, Taipei, vol.2, pag.27.
- [40]Ohta Y., Goto N. (1978) "Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes" Earthquake Engineering and Structural Dynamics, vol.6.
- [41]Reese L.C., Cox W.R., Koop F.D. (1974) "Analysis of laterally loaded piles in sand" Proc. VI Offshore Technology Conference, OTC 2080, Houston, Texas.
- [42]Rocchi G.F. (2003) "Correlazione empirica tra coefficiente di permeabilità, indice dei vuoti e caratteristiche di plasticità in argille e limi" Documento interno Studio Geotecnico Italiano.
- [43]Serafim J.L., Pereira J.P. (1983) "Considerations of the geomechanic classification of Bieniawski" Proc. Int. Symp. On Engg, Geol. And Underground Constr. (L.N.E.C., Lisb. Portugal), Vol.1, Section 2, pp.33-42.
- [44]Simpson B., Calabresi G., Sommer H., Wallays M. (1979) "Design parameters for stiff clays" General Report, Proc. 7th ECSMFE, Brighton.
- [45]Sjoberg J. (1997) "Estimating rock mass strength using the Hoek-Brown failure criterion and rock mass classification – A review and application to the Aznalcollar Open Pit" Internal Report, Division of Rock Mechanics, Lulea University of Technology.
- [46]Skempton A.W. (1986) "Standard Penetration Test procedures and the effects in sands of overburden pressure, relative density, particle size, ageing and overconsolidation" Geotechnique 36, n° 3.
- [47]Somerville S.H. (1986) "Control of groundwater for temporary works" CIRIA Report 113.
- [48]Stroud M.A. (1974) "The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks" Proceedings ESOPTI.
- [49]Stroud M.A. (1988) "The Standard Penetration Test – Its application and interpretation" Penetration Testing in UK, Proceedings of the Geotechnical Conference organized by ICE, Birmingham.
- [50]Tokimatsu K., Yoshimi Y. (1983) "Empirical correlation of soil liquefaction based on SPT N-value and fines content" Soils and Foundations 23, n° 4.
- [51]Vucetic M., Dobry R. (1991) "Effect of soil plasticity on cyclic response" Journal of Geotechnical Engineering, vol. 117, n° 1, pp. 89-107.
- [52]Youd T.D. (1972) "Factors controlling maximum and minimum density of sands" Proceedings of Symposium on Eval. Dens., ASTM STP 523.