

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP J84C19000370009

## U.O. PROGETTAZIONE INTEGRATA NORD

### PROGETTO DEFINITIVO

#### LINEA A.V. /A.C. MILANO - VERONA

#### NODO DI BRESCIA

#### POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA

#### CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA INTERVENTO

Relazione geotecnica generale

SCALA:

-

COMMESSA LOTTO FASE ENTE TIPO DOC. OPERA/DISCIPLINA PROGR. REV.

IN1M 10 D 26 RG OC00000 001 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva		Novembre 2021	N.Carella <i>Carle</i>	Novembre 2021	L.Barchi <i>LB</i>	Novembre 2021	A.Perego Novembre 2021



File: IN1M10D26GE0005001A.DOCX

n. Elab.: 1

## INDICE

1	PREMESSA.....	4
2	NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	6
	2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO .....	6
	2.2 DOCUMENTI PROGETTO FTE II FASE .....	6
	2.3 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO PD.....	6
	2.4 BIBLIOGRAFIA .....	7
3	DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO.....	8
4	INDAGINI GEOGNOSTICHE DISPONIBILI.....	11
5	LIVELLO DELLA FALDA.....	15
6	INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO DI RIFERIMENTO.....	16
	6.1 MODELLO GEOLOGICO LOCALE .....	16
	6.2 UNITÀ GEOTECNICHE .....	16
7	CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	17
	7.1 MATERIALI A GRANA GROSSA .....	18
	7.2 MATERIALI A GRANA FINA.....	21
8	MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO.....	25
	8.1 STRATIGRAFIE DI RIFERIMENTO .....	25
	8.2 PARAMETRI GEOTECNICI PER TERRENI A GRANA GROSSA.....	27
	8.3 PARAMETRI GEOTECNICI PER TERRENI A GRANA FINE .....	34
	8.4 PERMEABILITÀ DA PROVE IN SITO LEFRANC .....	38
	8.5 SCHEMA STRATIGRAFICO E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO .....	39
9	CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO .....	41

## 9.1 ACCELERAZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE

42

9.1.1	Premessa.....	42
9.1.2	Vita Nominale, Classe d’Uso, Periodo di Riferimento per l’Azione Sismica.....	43
9.1.3	Stati limite e relative probabilità di superamento .....	44
9.1.4	Accelerazione di Riferimento su Suolo Rigido .....	45
9.1.5	Risposta Sismica Locale .....	46
9.1.6	Coefficienti sismici per le verifiche di stabilità dei rilevati.....	47
10	STABILITA` NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE.....	48
11	ALLEGATO A– VERIFICHE LIQUEFAZIONE .....	53

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 4 di 70

## 1 PREMESSA

La presente Relazione Geotecnica Generale è parte del Progetto Definitivo del Potenziamento Infrastrutturale dello Scalo di Brescia; tale progetto riguarda la realizzazione di diversi interventi, fra questi, in particolare:

- realizzazione del nuovo PRG di scalo per adeguarlo alle nuove esigenze di traffico merci;
- realizzazione dell'asta di manovra lato Milano, lunga 750 m, che permetterà l'instradamento dei treni verso Verona;
- realizzazione dell'asta 350 m, prolungamento verso Milano di quella di manovra esistente, parallela alla linea Milano-Verona ed attualmente in esercizio;
- adeguamento del binario 17 e rettifica di linea AV-AC;
- realizzazione di tronchino L = 60 m ad Ovest del fiume Mella.

Nella Figura 1 e nella Figura 2 sono riportate, rispettivamente, l'ubicazione dello scalo di Brescia ed il dettaglio dell'area di intervento.

Nella presente Relazione Geotecnica Generale l'attenzione è rivolta ai seguenti aspetti:

- ricostruzione del modello geotecnico del sottosuolo, sulla base dei risultati delle indagini eseguite nel corso di precedenti campagne (2012-2019) e della campagna ultimata nel febbraio 2021;
- definizione dei modelli di comportamento meccanico dei terreni a grana fina ed a grana grossa da utilizzare per i calcoli e le verifiche geotecniche nei riguardi dei diversi stati limite, di esercizio SLE, ed ultimo SLU;
- determinazione dei valori dei parametri dai quali dipendono i diversi modelli di comportamento meccanico dei terreni;
- verifica nei riguardi della liquefazione dei terreni intercettati in corrispondenza delle verticali di indagine eseguite nel 2021, S1\_PD-BS ed S2\_PD-BS, e delle verticali di indagine eseguite nel 2019, S1 ed S2.

Si rimandano, invece, alla "Relazione di calcolo rilevati e trincee ferroviari" i seguenti calcoli:

- calcolo dei cedimenti dei rilevati lungo l'Asta L = 750 m e l'Asta L = 350 m;
- verifiche di stabilità globale in condizioni statiche ed in condizioni sismiche dei rilevati (L = 750 m ed L = 350 m), per le medesime sezioni di calcolo dei cedimenti;

Si fa osservare che si è ritenuto opportuno anticipare le verifiche nei riguardi del collasso alla presente fase di lavoro, seppure questa sia dedicata alla ricostruzione del modello geotecnico del sottosuolo ed alla caratterizzazione geotecnica dei terreni. Con questa scelta è stato possibile escludere, sin dalla presente fase, la necessità di modificare la geometria dei rilevati; infatti, queste modifiche avrebbero avuto impatto sul dimensionamento geotecnico e strutturale di altre opere interferenti con questi manufatti di terra.



Figura 1 - Quadro generale dell'area comprendente lo scalo di Brescia

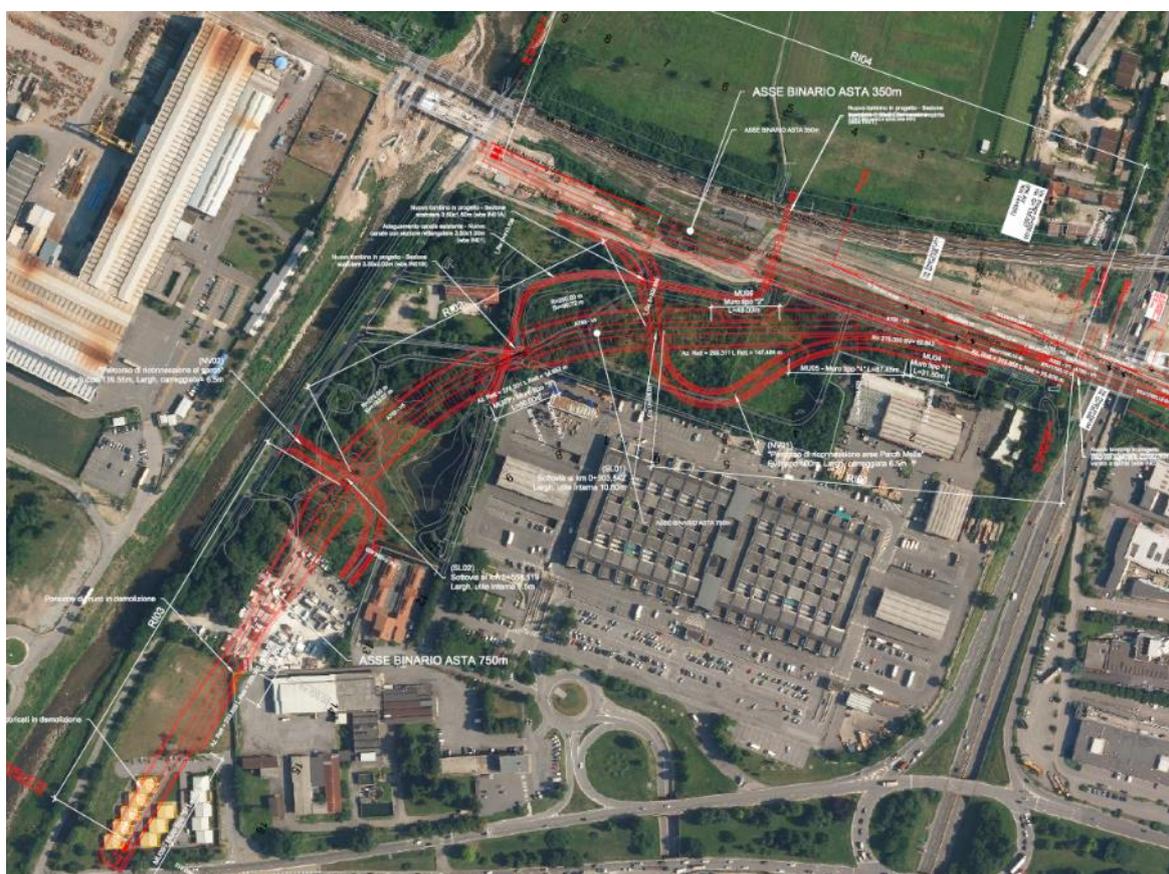


Figura 2 - Dettaglio dell'area di intervento.

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 6 di 70

## 2 NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

### 2.1 NORMATIVA E STANDARD DI RIFERIMENTO

- DM 17/01/2018 – «Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”».
- Circolare del 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP. – Istruzioni per l’applicazione dell’«Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.
- RFI DTC SI PS MA IFS 001 E del 2020: “Manuale di Progettazione delle Opere Civili, Parte II, Sezione 2 – Ponti e strutture”;
- RFI DTC SI CS MA IFS 001 del 2020: “Manuale di Progettazione delle Opere Civili, Parte II, Sezione 3 – Corpo stradale”.

### 2.2 DOCUMENTI PROGETTO FTE II FASE

[1] ITALFERR – PFTE: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Relazione Geotecnica Generale (IN0Y10F10GEGE0006001A).

[2] ITALFERR – PFTE: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Carta geologica e Profili Geologici (IN0Y00F69G5GE0001001A - IN0Y00F69FZGE0001001A - IN0Y00F69FZGE0001002A).

### 2.3 DOCUMENTAZIONE DI PROGETTO PD

[3] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Relazione Geologica, Geomorfologica, Idrogeologica e Sismica (IN1M10D69RGGE0001001A).

[4] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Relazione Indagini Pregresse (IN1M10D69RHGE0001001A).

[5] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Relazione Esiti Indagini in Situ (IN1M10D69SGGE0001001A).

[6] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Relazione Esiti Indagini Geofisiche (IN1M10D69IGGE0001001A).

	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 7 di 70

[7] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Profilo Geotecnico – Asta 350m (IN1M10D26F6GE0005001A).

[8] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Profilo Geotecnico – Asta 750m (IN1M10D26F6GE0005002A).

[9] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Profilo Geotecnico – Binario 17 Scalo (IN1M10D26F6GE0005003A).

[10] ITALFERR – PD: “LINEA AV/AC MILANO-BRESCIA. POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA”. Profilo Geotecnico – Adeguamento linea AV (IN1M10D26F6GE0005005A).

## 2.4 BIBLIOGRAFIA

- Associazione Geotecnica Italiana - Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - Giugno 1977.
- GeoStudio 2018, “Stability Modeling with GeoStudio”. Geo-Slope International, Ltd
- GeoStudio 2018, “Stress-Strain Modeling with GeoStudio”. Geo-Slope International, Ltd
- 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.
- Schmertmann J.H. 1977. Interpreting the Dynamics of the Standard Penetration Test. Univ. Of Florida, Gainesville (USA).

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 8 di 70

### 3 DESCRIZIONE DEGLI INTERVENTI IN PROGETTO

Come indicato in precedenza, gli interventi in progetto sono finalizzati ad un generale adeguamento e potenziamento Infrastrutturale dello Scalo di Brescia. In particolare è prevista la realizzazione di due nuove aste (L = 350 m ed L = 750 m), l'adeguamento del binario 17, la rettifica di linea AV-AC e la costruzione di alcuni manufatti di c.a. ed opere minori.

Con riferimento alle questioni che riguardano più strettamente l'Ingegneria Geotecnica, l'attenzione è stata rivolta, in particolare, alle opere descritte sinteticamente di seguito. Queste opere saranno realizzate sulla superficie pianeggiante, avente estensione dell'ordine di 10 ha circa e solo parzialmente edificata, che si rintraccia fra la direttrice Milano-Verona, a Nord, la pista carrabile di Via Girelli, solo parzialmente asfaltata, in sponda sinistra dell'incisione che contiene l'alveo del fiume Mella, ad Ovest, la sede stradale di Via Orzinuovi, a Sud, il confine Ovest e Nord del mercato ortofrutticolo di Brescia.

#### Asta di Fase 1 - L = 350 m

Sarà realizzata estendendo verso Ovest (direzione Milano) la sede attuale dei due binari di servizio. A tal fine è prevista la riprofilatura del fianco Sud del rilevato esistente, mediante scavo sino a quote minori del piano di campagna attuale (129.5 m s.m. circa imposta fondazione muro di sostegno), la costruzione di un muro di sostegno di c.a. con altezza di 5.5 m circa, il ritombamento a tergo del muro e contro il paramento del rilevato (profilo risagomato), in modo tale da ricostituire la sede dei due binari ad una quota minore di quella del rilevato di linea in esercizio. Per garantire le condizioni di sicurezza (nei riguardi degli SLE ed SLU) dei binari esistenti, compresi quelli AV-AC Milano-Verona, la differenza di quota tra i binari di servizio e quelli di linea sarà sostenuta mediante una paratia di pali di piccolo diametro. Questa struttura di contenimento sarà realizzata prima di riprofilare il fianco Sud del rilevato esistente. A fine costruzione la geometria del rilevato ferroviario sarà caratterizzata da un coronamento alla quota attuale (136 m s.m.) ed una banca alla quota di 134.1 m s.m. poco al di sotto della sommità del muro di contenimento (134.9 m s.m.).

#### Asta di Fase 2 - L = 750 m

Per la realizzazione dell'asta sarà costruito un nuovo rilevato, con innesto sull'esistente sede dei due binari di servizio, che saranno prolungati verso Ovest sul nuovo manufatto di terra di Fase 1 (asta L = 350 m). Il nuovo binario, con sviluppo complessivo di 860 m circa, sarà posato su un rilevato di altezza pari a 5.5 m circa, rispetto al piano di campagna circostante che, nell'area in esame, è attestato a quote di 129 m s.m. circa. La geometria del manufatto di terra è caratterizzata da larghezza al coronamento pari a 9 m circa, quota coronamento di 134.8 m s.m. e fianchi con pendenza pari a  $2v/3h$  (inclinazione rispetto all'orizzontale  $33.7^\circ$ ). L'impronta del rilevato alla base ha larghezza pari a 24.5 m circa. A partire dalla sezione di sfiocco, il tracciato, che si sviluppa in direzione Ovest, Ovest/Sud-Ovest, Sud-Sud-Ovest, comprende tre curve con raggi diversi ed un tratto terminale rettilineo. La sezione di chiusura di questo tratto,

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 9 di 70

che è orientato all'incirca parallelamente all'incisione del fiume Mella, dista 75 m circa dalla sede stradale di Via Orzinuovi.

### SL01 ed SL02

Il progetto prevede la costruzione di due sottovia funzionali all'accesso carrabile e pedonale alle unità abitative che dopo la costruzione dell'asta L = 750 m rimangono in area interclusa.

Si riporta di seguito una descrizione di queste opere, presenti lungo l'Asta L 750:

- 1) **SL01** previsto al km0+303.54 relativo al NV01 "Percorso di riconnessione aree Parco Mella" di dimensioni interne 10.8 x 5.2;
- 2) **SL02** previsto al km0+558.12 relativo al NV02 "Percorso di riconnessione al Parco Mella" di dimensioni interne 9.50 x 5.70.

### Opere di sostegno

Il progetto prevede l'inserimento di muri di sostegno per contenere il corpo dei rilevati in relazione alla differenza di quota tra il p.f. dei binari attigui o di stretto affiancamento e tra il p.f. e le aree di piazzale. Si differenziano nel seguito le opere di contenimento per l'Asta L 350 e l'Asta L 750. I muri di sostegno sono tutti in c.a. gettato in opera con altezze variabili fino a 7.00m di altezza, con paramento di spessore massimo 0.8m. In relazione alle caratteristiche dei terreni in sito, i muri in progetto hanno fondazioni dirette con una suola di spessore massimo di 1.00m.

Si riporta di seguito una descrizione di queste opere, presenti lungo le aste:

#### 1) Asta L 750

L'asta da 750m è caratterizzata dalla presenza di un binario che si dirama dall'asta L=350m per svilupparsi verso sud-ovest in affiancamento al fiume Mella.

Lungo il tracciato sono presenti alcuni tratti tra muri, in particolare:

- Muro MU01: tratto da Km 0+081.33 a Km 0+201.27 caratterizzato da muro a tutta altezza in sinistra per consentire l'inserimento del percorso di riconnessione delle aree del Parco Mella (paramento var. 4.45-5.50 x 0.80, fondazione 4.60 (0.50-0.80-3.30) x 0.9);
- Muro MU02: tratto da Km 0+208.26 a Km 0+257.26 caratterizzato da muro a tutta altezza in dx al fine di evitare l'interferenza con un canale irriguo esistente (paramento var. 5.63-6.10 x 0.80, fondazione 4.30 (0.50-0.80-3.00) x 0.9);
- Muro MU03: tratto da Km 0+381.34 a Km 0+430.65 a sezione ridotta compreso tra muri a tutta altezza per non interferire con le attività commerciali esistenti (paramento var. 6.10-6.90 x 0.80, fondazione 5.0 (0.50-0.80-3.70) x 1.0);
- Muro MU04: tratto da Km 0+705.06 a Km 0+725.06 caratterizzato da muro a tutta altezza in sinistra per limitare demolizioni ed espropri (paramento var. 5.54-6.04 x 0.80, fondazione 4.8 (0.50-0.80-3.50) x 0.9);

- Muro MU05: tratto da Km 0+772.06 a Km 0+857.08 caratterizzato da muro a tutta altezza in sinistra per limitare demolizioni ed espropri (paramento var. 6.32-6.57 x 0.80, fondazione 5.0 (0.50-0.80-3.70) x 0.9);

2) Asta L 350

L'asta si sviluppa parallelamente alla linea AV/AC Milano-Brescia, senza creare interferenza con quest'ultima: la sede della linea AV verrà delimitata, per la parte iniziale, mediante un muro di sottoscarpa e in successione, quando il dislivello tra il pf della linea AV e quello della linea di progetto, aumenta mediante una paratia di micropali.

- Muro MU07: tratto da Km 0+486.59 a Km 0+564.65 caratterizzato da muro a tutta altezza in sinistra (paramento var. 3.20-4.30 x 0.70, fondazione var. da 4.0 a 4.6 (0.50-0.70- var. 2.80-3.40) x 0.9)

Per ulteriori dettagli delle opere in progetto si rimanda alla Relazione Tecnica Generale di PD e alle Tavole di PD delle singole opere.

## 4 INDAGINI GEOGNOSTICHE DISPONIBILI

Per ricostruire il modello geotecnico del sottosuolo si è fatto riferimento ai risultati delle indagini sui terreni eseguite nell'ambito di quattro campagne di indagini.

Le prime tre, completate negli anni 2012, 2018, 2019, sono illustrate nel documento [4] (capitolo 2.3); i risultati di tali indagini sono richiamati nella Relazione Geotecnica del Progetto di Fattibilità Tecnica Economica (documento [1] capitolo 2.2). La campagna più recente, ultimata nel febbraio 2021, è stata programmata ad integrazione delle precedenti allo scopo di indagare i terreni di fondazione dell'asta L = 750 m di Fase 2. I risultati di tali indagini sono illustrati nei documenti [5] e [6].

Nella Figura 3 è riportato stralcio planimetrico dell'area di interesse con l'ubicazione delle diverse indagini.

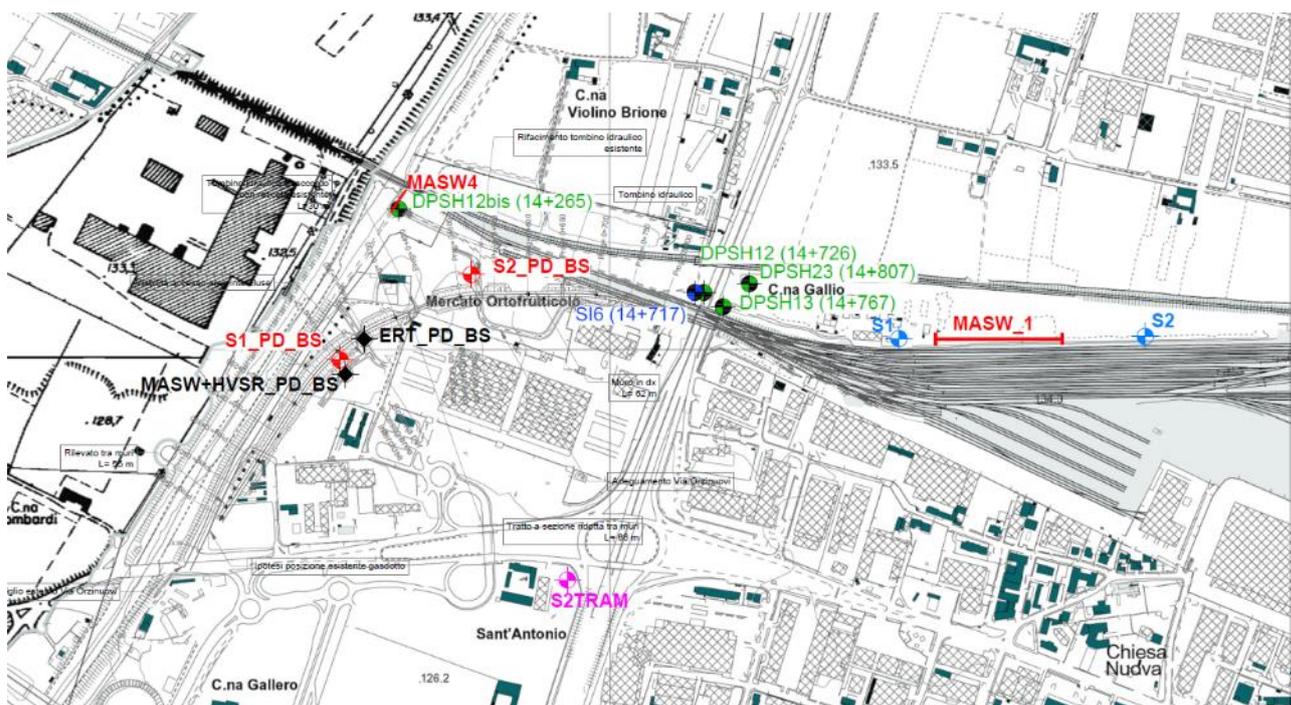


Figura 3 - Ubicazione indagini eseguite nelle campagne di indagini dal 2012 al 2021.

Tabella 1 – Elenco delle indagini in sito

Sondaggio	Anno	L (m)	Quota del boccaforo (m s.m.)	Campioni (1)	Profondità di prelievo dal boccaforo (m)	Prove SPT	Profondità di prova dal boccaforo (m)
S1	2019	30	132.66	7 CR	1.5 – 2.0	12	1.50 - 1.95
							3.00 – 3.45
					4.5 – 5.0		4.5 – 4.95
					6.0 – 6.5		6.0 – 6.45
					9.0 – 9.5		7.5 – 7.95
					12.0 - 12.5		9.0 – 9.45
					19.0 – 19.5		12.0 – 12.45
							15.0 – 15.45
							18.0 – 18.45
							21.0 – 21.45
							24.0 – 24.45
							27.0 – 27.45
S2	2019	30	133.19	6 CR	3.0 – 3.5	9	3.00 – 3.45
					4.5 – 5.0		6.0 – 6.45
					6.0 – 6.5		9.0 – 9.45
					9.0 – 9.5		12.0 – 12.45
					15.0 – 15.5		15.0 – 15.45
					18.0 – 18.5		18.0 – 18.45
S2Tram	2018	30	129.40	-----		5	4.5 – 4.95
							9.0 – 9.45
							15.0 – 15.45
							19.5 – 19.95
SI6	2012	30	131	-----		11	22.5 – 22.95
							26.0 – 26.45
							3.00 – 3.45
							4.5 – 4.95
							6.0 – 6.45
							7.5 – 7.95
							9.0 – 9.45
							10.5 – 10.95
							12.0 – 12.45
							13.5 – 13.95
							18.0 – 18.45
S1_PD-BS	2021	30	128.7	CR	1.7 – 2.0	10	1.50 - 1.95

							3.00 – 3.45
							4.5 – 4.95
					5.7 – 6.0		6.0 – 6.45
							9.0 – 9.45
							12.0 – 12.45
					11.7 – 12.0		15.0 – 15.45
							18.0 – 18.45
							21.0 – 21.45
					19.7 – 20.0		24.0 – 24.45
S2_PD-BS	2021	30	129.5	7 CR	1.7 – 2.0	11	1.50 - 1.95
							3.00 – 3.45
							4.5 – 4.95
							6.0 – 6.45
					7.7 – 8.0		7.5 – 7.95
							9.0 – 9.45
							12.0 – 12.45
					14.7 – 15.0		15.0 – 15.45
							18.0 – 18.45
				1 CI	17.5 – 18.0		21.0 – 21.45
							24.0 – 24.45

(1) Numero e tipo di campione prelevato: CI = campione indisturbato; CR = campione rimaneggiato (da carota o da cassetta catalogatrice);

Sondaggio	Anno	L (m)	Quota del boccaforo (m s.m.)	Prove di permeabilità in foro (Lefranc)	Profondità di prova (m) da boccaforo	Strumentazione installata
S1	2019	30	132.66	1	1.5 – 2.0	-----
S2	2019	30	133.19	1	6.0 – 6.5	-----
S2Tram	2018	30	129.40	2	8.0 – 8.6 14.7 – 15.0	Piez. Norton 3"
SI6	2012	30	131	-		Piez. Norton 3"
S1_PD-BS	2021	129.5	129.3	2	3.0 – 3.5 19.5 – 20.0	Piezometro a tubo aperto (2)
S2_PD-BS	2021	30	130.16	2	1.5 – 2.0 7.5 – 8.0	-----

(2) sondaggio attrezzato con piezometro a tubo aperto (finestrato da 9 a 30 m di profondità dal boccaforo)

La campagna di indagine integrative a supporto del presente PD, completata nel Febbraio-Marzo 2021, ha compreso la perforazione di 2 sondaggi a carotaggio continuo, S1\_PD-BS e S2\_PD-BS, entrambi spinti sino alla profondità di 30 metri dal piano di campagna, l'esecuzione di 10 + 11 prove SPT, l'esecuzione di due tomografie elettriche e di una prova geofisica di tipo MASW (MASW\_PD-BS).

Durante le perforazioni sono stati prelevati 4+4 campioni rimaneggiati da carota e 1 campione intatto (campione indisturbato); quest'ultimo è stato prelevato mediante fustella a pareti sottili. I campioni prelevati sono stati utilizzati per l'esecuzione, in laboratorio, di misure e prove per la determinazione delle proprietà fisiche e di prove meccaniche per la determinazione della resistenza al taglio (Tabella 2).

**Tabella 2 – Elenco delle prove di laboratorio (indagini 2019 ed indagini integrative 2021)**

Sondaggio	Campioni da carota	Profondità di prelievo dal boccaforo (m)	Prove di laboratorio [1]
S1	CR1	1.5 – 2.0	AG
	CR2	4.5 – 5.0	AG
	CR3	6.0 – 6.5	AG
	CR4	9.0 – 9.5	AG
	CR5	12.0 – 12.5	AG
	CR6	19.0 – 19.5	AG, LA
	CR7	24.0 – 24.5	AG
S2	CR1	3.0 – 3.5	AG
	CR2	4.5 – 5.0	AG
	CR3	6.0 – 6.5	AG
	CR4	9.0 – 9.5	AG
	CR5	15.0 – 15.5	AG, LA
	CR6	18.0 – 18.5	AG
S1_PD-BS	CR1	1.7 – 2.0	GS, AG
	CR2	5.7 – 6.0	GS, AG
	CR3	11.7 – 12.0	LA, GS, AG,
	CR4	19.7 – 20.0	GS, AG,
S2_PD-BS	CR1	1.7 – 2.0	LA, GS, AG,
	CR2	7.7 – 8.0	GS, AG,
	CI1	17.5 – 18.0	W, LA, G, GS, AG, TXCIU
	CR3	14.7 – 15.0	GS, AG,
	CR4	20.0 – 20.3	LA, GS, AG,

[1] W = Misura del contenuto naturale d'acqua; LA = Determinazione dei limiti di Atterberg; G = Determinazione del peso dell'unità di volume; GS = Determinazione del peso specifico dei grani; AG = Analisi granulometrica per stacciatura e sedimentazione (in presenza di terreni a grana fina); TXCIU = Prova triassiale consolidata e non drenata.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 15 di 70

## 5 LIVELLO DELLA FALDA

La posizione della falda alla quale fare riferimento ai fini del dimensionamento delle diverse opere in progetto, è stata definita sulla base delle informazioni relative alla geologia ed alla idrogeologia dell'area in esame.

Nella Relazione Geologica e Idrogeologica del PFTE (doc [2]) è indicato che la quota della falda in corrispondenza dell'asta 350m e della sezione Binario 17 e Scalo desunta dalle linee isofreatiche è compresa tra 115 e 116 m s.l.m.; mediante le misure eseguite nei sondaggi S1 ed S2, il livello dell'acqua è stato intercettato a profondità dal boccaforo di di 12,45 m e 15,20 che corrispondono a quote della falda pari a 120,21 m s.l.m. e 117,99 m s.l.m. rispettivamente.

I profili geotecnici sono stati tracciati assumendo che la falda si attesti alla quota di 118 m s.l.m secondo i dati delle misure eseguite nel sondaggio S2.

Per l'area a Sud dello Scalo, quindi il profilo geotecnico dell' asta 750 (doc [5]), il livello della falda viene fissato sulla base delle misure eseguite nei sondaggi S1\_PD-BS e S2\_PD-BS. Con tali letture il livello dell'acqua nel foro è segnato alle profondità di 10.2m (S1\_PD-BS) e di 11.0m (S2\_PD-BS) dal boccaforo e quindi; si ricavano, quindi, valori della quota di falda di 118.2m s.m. e 117.5m s.m. rispettivamente.

Ai fini del dimensionamento delle opere, l'altezza di falda è impostata a 118 m.s.l.m e viene considerata orizzontale sull'area di intervento.

	LINEA A.V./A.C.MILANO–VERONA					
	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 16 di 70

## 6 INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOTECNICO DI RIFERIMENTO

### 6.1 MODELLO GEOLOGICO LOCALE

Dal punto di vista geologico il territorio interessato dalle opere in progetto può essere descritto considerando due banchi di terreni riconducibili a depositi quaternari, differenziati come segue (vedi Profili Geologici, doc.[2]):

- *Alluvioni attuali o recenti (aa)*: costituiti generalmente di ghiaie e sabbie; a luoghi sono stati intercettati livelli di terreni a grana fina, argilloso-limosi;
- *Alluvionali fluvioglaciali e fluviali (fg)*: depositi alluvionali più antichi costituiti da terreni grossolani ghiaiosi, sabbiosi e limosi.

### 6.2 UNITÀ GEOTECNICHE

Sulla base delle stratigrafie dei sondaggi eseguiti nel corso della campagna 2021 e di quelli ultimati nell'ambito delle precedenti campagne è stata evidenziata la presenza di depositi alluvionali (**aa**) e depositi fluvioglaciali (**fg**), tutti prevalentemente a grana grossa, fatta eccezione per alcune zone in cui sia gli uni che gli altri presentano locali inclusioni di terreni argilloso-limosi.

Ai fini della caratterizzazione meccanica, ciascuna delle due unità può essere suddivisa in due sub-unità, secondo lo schema seguente: **aa-G(S)** ed **aa-A(L)** ed inoltre **fg-S(L)** ed **fg-A(L)** riferite, rispettivamente, alla parte con maggiore presenza ghiaioso-sabbiosa ed a quella con sensibile contenuto delle frazioni argillosa e -limosa.

Nel caso dei terreni che si riconducono alla unità **fg**, si è scelto, cautelativamente, di caratterizzare la sub unità con prevalenza a grana grossa immaginando la predominanza della componente sabbiosa rispetto a quella ghiaiosa (**fg-S(L)**).

In sintesi, sono stati definite le seguenti unità geotecniche:

- **aa: depositi alluvionali differenziati in:**
  - aa-G(S) a presenza predominante ghiaioso-sabbiosa – grana grossa;
  - aa-A(L) a presenza predominante argilloso-limosa – grana fina;
- **fg: depositi fluvioglaciali differenziati in:**
  - fg-S(L) a presenza predominante sabbiosa – grana grossa;
  - fg-A(L) a presenza predominante argilloso-limosa – grana fina.

Dal punto di vista delle analisi e verifiche di calcolo, si distinguono, ancorché costituite di terreni a grana grossa, le opere di terra; in pratica i rilevati esistenti di linea e quelli delle aste in progetto. Per entrambe le opere si farà riferimento alla medesima unità (**R**), di fatto il corpo del rilevato ferroviario, in relazione all'asta 750m ed all'altra opera 350m. Per tutte queste opere di terra sono stati assunti valori dei parametri geotecnici allineati a quelli riportati nella Relazione PFTE.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 17 di 70

## 7 CRITERI PER LA CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La caratterizzazione geotecnica è sviluppata nell'ipotesi che il terreno possa essere assimilato ad un mezzo bifase, secco o saturo rispettivamente al di sopra ed al di sotto del livello della falda; con tale termine si indica la superficie che, ai fini di una specifica analisi o calcolo, identifica il luogo dei punti caratterizzati da pressione interstiziale nulla. Questa ipotesi è adottata per tutte le analisi geotecniche, sia quelle mirate alla verifica di sicurezza nei riguardi del collasso (SLU) sia quelle inerenti la verifica nei riguardi dell'esercizio (SLE), finalizzate al controllo dell'ammissibilità di spostamenti e rotazioni.

Ne discende la scelta di trascurare qualunque contributo di resistenza che possa essere associato a condizioni di parziale saturazione, dalle quali deriva l'insorgenza di pressioni interstiziali negative, alle quali si associa l'incremento della rigidità e della resistenza a rottura. Da questo fenomeno potrebbe dipendere, seppure solo in parte, la variazione delle resistenze registrate nelle prove SPT all'aumentare della profondità.

Con tale ipotesi di base, la caratterizzazione geotecnica è sviluppata distinguendo le «analisi al collasso» dalle «analisi in condizioni di esercizio».

Le prime sono mirate alle verifiche di stabilità globale, al riconoscimento delle condizioni corrispondenti al raggiungimento della condizione di rottura, in tal caso alla individuazione della cinematica del collasso, in generale al dimensionamento geotecnico di massima. Queste analisi sono sviluppate adottando il modello di Mohr-Coulomb con involuppo di rottura lineare, o lineare a tratti, per descrivere la risposta meccanica a rottura del terreno. Pertanto, la resistenza al taglio è univocamente definita allorché siano fissati i valori dei parametri che descrivono l'involuppo in termini di tensioni efficaci ovvero in termini di tensioni totali. Nel caso in cui si adotti un involuppo di rottura lineare a tratti sarà anche specificato l'intervallo della tensione efficace sulla superficie di rottura; in tal modo sarà delimitato il campo di applicabilità dei parametri del modello lineare.

Le «analisi in condizioni di esercizio» sono mirate a verificare che gli spostamenti e le rotazioni siano minori dei rispettivi valori limiti ritenuti accettabili, e quindi che siano rispettati i requisiti prestazionali. Nella generalità dei casi queste analisi, che concorrono ad ottimizzare la soluzione progettuale, si eseguono assimilando il terreno ad un mezzo elastico lineare.

Per tenere conto che il comportamento del terreno reale è marcatamente non lineare, si adotta lo schema di mezzo lineare-equivalente, diffusamente applicato negli studi di propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo, quali, ad esempio, le analisi di risposta sismica locale (RSL).

Così, mutuando l'impostazione di queste analisi dinamiche, i calcoli sono sviluppati secondo un processo iterativo, a partire da una stima iniziale dei parametri di rigidità ( $G = G_1 < G_0$ ). Si ricavano, di conseguenza, le deformazioni ( $\varepsilon_1, \gamma_1$ ) e gli spostamenti del sistema geotecnico che derivano da tale scelta del valore da assegnare a questo parametro di rigidità. Sulla base del livello di deformazione subito dal sistema ( $\varepsilon_1, \gamma_1$ ) è semplice, quindi, aggiornare l'iniziale stima dei parametri di rigidità (ponendo  $G = G_2 < G_1$ ) utilizzando curve di

decadimento dei moduli ricavate da prove geotecniche dinamiche di laboratorio ovvero desunte dalla letteratura per terreni simili a quelli di interesse.

Il procedimento si completa allorché i valori dei parametri di rigidità adottati per una generica iterazione sono congruenti con il livello di deformazione che si determina; nella generalità dei casi si raggiunge la convergenza dopo 2-4 iterazioni, in dipendenza dell'iniziale stima dei parametri rispetto al livello di deformazione finale.

Con riferimento ai problemi in esame, ed in particolare riguardo il calcolo dei cedimenti dei rilevati, si fa osservare che non è stato necessario prevedere significativi abbattimenti dei moduli di rigidità. Infatti, sia i materiali da costruzione dei rilevati, sia i terreni a grana grossa intercettati con i sondaggi possono mobilitare una elevata resistenza a rottura ed esibire una discreta rigidità. Pertanto le deformazioni non sono sensibilmente diverse da quelle attese per la maggior parte delle opere geotecniche e le curve di decadimento risultano adeguate al processo iterativo descritto in precedenza.

## 7.1 MATERIALI A GRANA GROSSA

La caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana grossa è sviluppata, principalmente, sulla base dei risultati delle prove SPT in foro, dei risultati delle indagini sismiche (MASW), dei risultati delle prove di laboratorio eseguite su campioni rimaneggiati. Queste ultime sono state mirate alla classificazione del materiale estratto con le perforazioni.

L'interpretazione delle prove in sito è finalizzata a determinare:

- parametri di resistenza al taglio;
- parametri di deformabilità;
- coefficienti di permeabilità.

### Parametri di resistenza al taglio

Per la stima dell'angolo di resistenza al taglio  $\Phi$  è stata utilizzando la correlazione proposta da Schmertmann

$$\Phi = \tan^{-1} \left[ \frac{NSPT}{12.2 + 20.3 \frac{\sigma'_{v0}}{p_a}} \right]^{0.34}$$

In tale relazione  $\sigma'_{v0}$  è la tensione verticale efficace alla profondità di prova e  $p_a$  è il valore della pressione atmosferica, che si assume pari a 100 kPa. Le tensioni  $\sigma'_{v0}$  e  $p_a$  sono espresse con le medesime unità di misura.

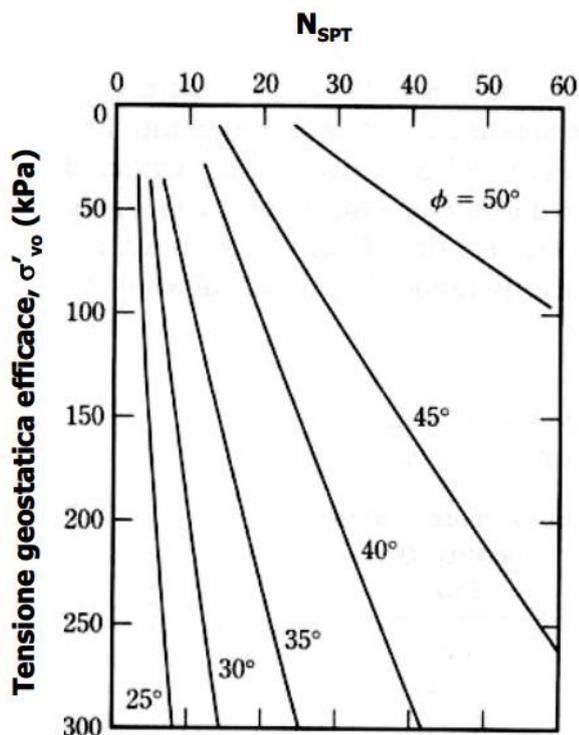


Figura 4: Stima di  $\Phi'$  a partire da  $N_{spt}$  secondo SCHMERTMANN (1975)

#### Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità possono essere stimate:

- sulla base dei risultati di indagini geofisiche (MASW);
- dall'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

Il modulo di taglio iniziale ( $G_0$ ) e quello di Young iniziale ( $E_0$ ), associabili a piccole deformazioni, possono essere ricavati dai valori delle velocità delle onde di taglio ( $V_S$ ) utilizzando le seguenti correlazioni:

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

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

In tali relazioni i diversi simboli hanno il significato seguente:

$\gamma_t$  = peso dell'unità di volume allo stato naturale, assunto pari a 19 kN/m<sup>3</sup>;

$\nu$  = coefficiente di Poisson (assunto pari a 0.3);

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 20 di 70

$V_S$  = velocità delle onde di taglio in m/sec.

La velocità delle onde di taglio ( $V_S$ ) può essere ricavata direttamente dai risultati di prove geofisiche in foro di sondaggio e da prove geofisiche di superficie; alternativamente può essere stimata elaborando i risultati delle prove penetrometriche dinamiche in foro SPT.

Nel caso in esame sono state utilizzate le correlazioni di Ohta e Goto (1978) e di Yoshida e al. (1988).

- **Correlazione di Ohta e Goto (1978)**

$$V_S = C \cdot (N_{SPT})_{50\%}^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \quad [m/s]$$

con la seguente notazione dei simboli

- $C = 67,3$
- $z$  = profondità dal p.c. in metri
- $f_A$  = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito
- $f_G$  = coefficiente funzione della composizione granulometrica

$f_A$	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

**Tabella 3 - 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 4 - Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente  $f_G$  (funzione della composizione granulometrica)**

Nel caso in esame:

- $f_a=1.0$  per tutte;
- $f_g=1.14$  per **aa-G(S)** e  $f_g=1.09$  per **fg-S(L)**.

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	PROGETTO DEFINITIVO POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA					
RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 21 di 70

## 7.2 MATERIALI A GRANA FINA

La caratterizzazione geotecnica dei terreni a grana fine, appartenenti alle sub unità aa-A(L) e fg-A(L) è basata sull'interpretazione delle prove di laboratorio e, subordinatamente, delle prove in sito.

Le prove geotecniche di laboratorio sono le seguenti:

- Analisi granulometrica;
- Proprietà fisiche;
- Limiti di Atterberg;
- Prova Triassiale CIU

Le indagini sono finalizzate a ricavare:

- 1) la classificazione dei materiali;
- 2) la determinazione delle seguenti caratteristiche:
  - parametri di resistenza al taglio;
  - parametri di deformabilità;
  - caratteristiche di consolidazione;
  - coefficienti di permeabilità.

### Parametri di resistenza

Per la stima della resistenza al taglio non drenata  $c_u$  dei terreni a grana fina (terreni coesivi) sono state adottate le seguenti relazioni, funzioni dei risultati delle prove penetrometriche dinamiche SPT:

- Correlazione di Terzaghi e Peck (coesione non drenata in kPa) nel caso di terreni limoso-argillosi saturi

$$c_u = 6.75 \cdot (N_{SPT})$$

- Correlazione di Stroud (coesione non drenata in kPa)

$$c_u = f_1 N_{SPT}$$

in cui  $f_1$  è un coefficiente funzione dell'indice di plasticità che varia nel campo  $f_1 = 3.5-6.6$  kPa.

Per la stima della resistenza al taglio in termini efficaci, ovvero in condizioni drenate / a lungo termine, la caratterizzazione meccanica è sviluppata nell'ipotesi che il terreno reale sia assimilabile ad un mezzo bifase, saturo o secco rispettivamente al di sotto ovvero al di sopra del livello della falda ed utilizzando il noto modello di Mohr-Coulomb.

Ai fini delle analisi geotecniche oggetto del presente lavoro si assume che l'involuppo di rottura del modello di Mohr-Coulomb sia assimilabile ad una retta e si fa riferimento ai valori dei parametri di resistenza al taglio espressi in termini di tensioni efficaci.

In tal caso la resistenza a rottura è definita dalla relazione  $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ , funzione dei due parametri, il valore dell'intercetta sull'asse delle  $\tau$ , ovvero coesione efficace  $c'$ , e l'angolo di inclinazione della retta involuppo rispetto all'orizzontale, ovvero angolo di resistenza al taglio o angolo di attrito efficace  $\phi'$ .

I valori dei parametri geotecnici per la modellazione della resistenza a rottura sono ricavati elaborando il numero dei colpi annotato nel corso delle prove penetrometriche dinamiche SPT ed i risultati della prova di compressione triassiale.

In mancanza di prove di resistenza di laboratorio e/o di sito, per la stima dell'angolo di resistenza al taglio dei terreni a grana fine viene utilizzata la correlazione con l'indice di plasticità rappresentata nella Figura 5 (Navfac 7.1 1982).

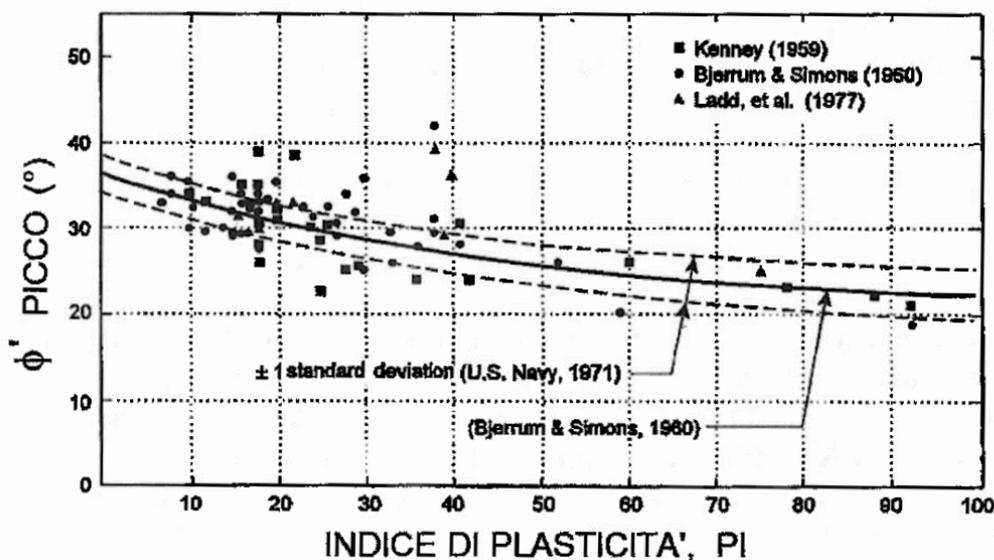


Figura 5 - Valori dell'angolo  $\phi'$  in funzione dell'indice di plasticità per terre a grana fine

#### Parametri di deformabilità

Per la determinazione del modulo di elasticità tangenziale a bassi livelli di deformazione per terreni a grana fina è possibile utilizzare la correlazione seguente:

$$G_0 = (250 - 500) \cdot c_U$$

### Caratteristiche di consolidazione

Il coefficiente di consolidazione dei terreni a grana fina è stato stimato sulla base dei risultati delle prove di laboratorio e di correlazioni di letteratura; al riguardo è stata utilizzata la relazione rappresentata nella Figura 6 (Navfac 7.1, 1982).

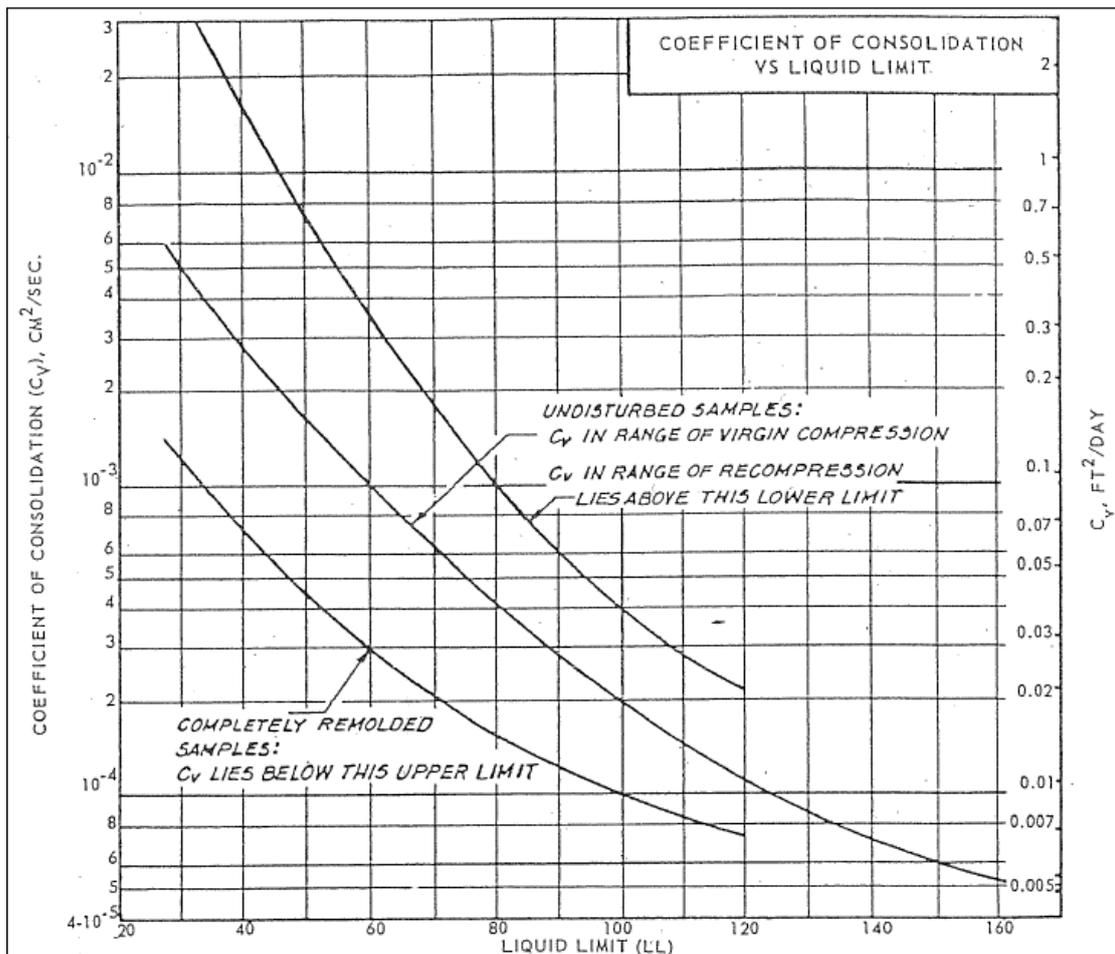


Figura 6 – Grafico di correlazione limite liquido – Cv (Navfac Design Manual 7.1, 1982)

### Rigidezza

I valori dei parametri di rigidezza sono stati ricavati dai valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  riportati nei documenti relativi alle elaborazioni delle indagini geofisiche di superficie.

A partire dai valori della velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ), i valori dei parametri di rigidezza dei terreni rappresentativi della risposta ai carichi a bassi livelli di deformazione (pedice 0) si ricavano applicando le note relazioni della teoria dell'elasticità. Di conseguenza

si ottiene:

$$G_0 = (\rho) (V_s)^2 \quad E_0 = 2(1 + \nu) (G_0) \quad M_0 = 2 G_0 [(1 + \nu) (1 - \nu)] / [1 - \nu - 2 \nu^2]$$

Per tenere conto che il comportamento meccanico dei terreni è marcatamente non lineare, i valori dei parametri di rigidezza relativi a bassi livelli di deformazione sono stati abbattuti applicando un fattore di riduzione di 0.3; tale fattore è scelto tenendo conto delle caratteristiche delle opere in progetto e dell'entità degli spostamenti che possono ragionevolmente prevedersi, in considerazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche dei terreni intercettati nel sottosuolo. Per il coefficiente di Poisson  $\nu$  si assume il valore costante e pari a  $\nu = 0.3$ .

#### Costante elastica di sottofondo secondo il Modello di Winkler

Come noto questo modello è applicato nell'ipotesi che la risposta del terreno possa essere assimilata a quella di un letto di molle indipendenti.

Per la stima del valore della costante elastica della molla ( $k_w$ ), costante di sottofondo, utilizzata per descrivere la risposta del contatto terreno-struttura, è stata utilizzata la relazione  $k_w = M/B$  nella quale B è una dimensione rappresentativa della fondazione ed M è il modulo edometrico, o modulo di compressione in condizioni monodimensionali o edometriche (espansione laterale impedita).

## 8 MODELLO GEOTECNICO DI SOTTOSUOLO

### 8.1 STRATIGRAFIE DI RIFERIMENTO

Sulla base dei risultati delle indagini disponibili sono state ricostruite le stratigrafie geotecniche sintetizzate nelle seguenti tabelle.

Tabella 5 - Stratigrafia sondaggio S1.

profondità da testa foro (m)	Descrizione	Profondità prova da testa foro (m)	k (m/s)	N <sub>30</sub>
0.0 – 2.2	Sabbia e ghiaia localmente deb limosa con clasti	1.5	4.03·10 <sup>-5</sup>	34
2.2 – 2.9	Sabbia fine e argilla limosa, localmente con clasti			
2.9 – 8.3	Ghiaia e Sabbia	3.0 4.5 6.0 7.5		51 R 26 41
8.3 – 14.9	Sabbia con ghiaia e rari ciottoli	9.0 12.0		29 34
14.9 – 23.1	Sabbia e ghiaia con limo da argillosa a deb argillosa (presenze di locali livelli centimetrici di sostanza organica)	15.0 18.0 21.0		34 30 27
23.1 – 27.7	Ghiaia e sabbia localmente con clasti (da 26.75m a 27.70 m livelli da sabbia da medio-fine a medio-grossolana)	24.0 27.0		52 42
27.7 – 29.25	Argilla limosa, localmente deb sabbiosa			
29.25 – 30.0	Argilla con ghiaia e clasti			

Tabella 6 - Stratigrafia sondaggio S2

profondità da testa foro (m)	Descrizione	Profondità prova da testa foro (m)	k (m/s)	N <sub>30</sub>
0.0 - 1.5	Sabbia con ghiaia			
1.5 – 2.8	Argilla limosa, con limo ghiaiosa (da 2.65 m livello di sabbia con ghiaia,			

	argillosa)			
2.8 – 6.3	Sabbia e Ghiaia da ciottolosa a con ciottoli (da 5.85 m a 6.15 m livello di sabbia con ghiaia, con limo)	3.0 6.0	$8 \cdot 10^{-5}$	R 26
6.3 – 11.3	Sabbia deb limosa con ghiaia e ciottoli	9.0		32
11.3 – 14.45	Sabbia e ghiaia con limo da argillosa a deb argillosa	12.0		R
14.45 -15.0	Argilla con sabbia, con ghiaia, limosa	15.0		19
15.0 – 21.0	Sabbia con argilla, limosa, ghiaiosa (a partire da 17.25m presenza di trovanti litici, e da 18.7 m a 19.0m di livelli di argilla)	18.0 21.0		45 88
21.0 – 28.2	Sabbia e ghiaia con ciottoli , limosa (da 21.8 m a 22.3 m livello di argilla limosa; da 23.0 m a 23.25 m livello di argilla deb limosa e deb sabbiosa)	24.0 27.0		41 37
28.2 - 30.0	Sabbia e ghiaia, con limo, loc argillosa (da 28.8 m a 29.0 m livello di sabbia fine con limo)			

Tabella 7 - Stratigrafia sondaggio S1\_PD-BS

profondità da testa foro (m)	Descrizione	Profondità prova da testa foro (m)	k (m/s)	N <sub>30</sub>
0.0 - 1.5	Sabbia grossolana	1.5		71
1.5 – 2.0	Ghiaia sabbiosa			
2.0 – 5.5	Ghiaia e Sabbia	3.0 4.5	$2.3 \cdot 10^{-4}$	43 5
5.5 – 8.0	Ghiaia e sabbia grossolana deb.limosa	6.0		18
8.0 – 11.8	Sabbia deb limosa con ghiaia e ciottoli	9.0		54
11.8 – 12.8	Ghiaia e sabbia deb.limosa	12.0		25
12.8 – 20.5	Sabbia e ghiaia deb.limosa	15.0 18.0 20.0	$2.1 \cdot 10^{-5}$	51 62
20.5 – 22.0	Sabbia	21.0		57
22.0 – 24.4	Sabbia limosa	24.0		32
24.2 – 25.8	Ghiaia			
25.8 – 30.0	Sabbia e ghiaia			

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A

**Tabella 8 - Stratigrafia sondaggio S2\_PD-BS.**

profondità da testa foro (m)	Descrizione	Profondità prova da testa foro (m)	k (m/s)	N <sub>30</sub>
0.0 - 1.5	Sabbia grossolana			
1.5 - 2.0	Limo sabbioso	1.5 2.0	3.5·10 <sup>-4</sup>	8
2.0 - 9.0	Sabbia deb.limosa con inclusi ghiaiosi	3 4.5 6 7.5	6.5·10 <sup>-5</sup>	38 24 46 23
9.0 - 10.5	Ghiaia e sabbia grossolana deb.limosa	9.0		34
10.5 - 17.0	Sabbia deb limosa con ghiaia e ciottoli	12 15		20 48
17.0 - 18.5	Limo argilloso	18		24
18.5 - 21.0	Sabbia con ghiaia e ciottoli	21		30
21.0 - 25.5	Sabbia limosa con ghiaia e ciottoli	24		45
25.5 - 30.0	Sabbia e ghiaia			

## 8.2 PARAMETRI GEOTECNICI PER TERRENI A GRANA GROSSA

In considerazione delle indagini geotecniche disponibili e della natura dei terreni, la caratterizzazione geotecnica è sviluppata privilegiando un approccio cautelativo.

### Proprietà fisiche

I valori delle caratteristiche fisiche dei terreni a grana grossa ricavati mediante le misure e prove di laboratorio sono riassunte in Tabella 9 e Tabella 10.

Si segnala che nell'interpretazione dei risultati si è tenuto conto delle modalità di prelievo dei campioni (da carota) e della natura dei terreni. In generale, pertanto, non sono disponibili, per la natura dei terreni o perché la determinazione non sarebbe stata significativa, i valori dell'indice dei vuoti ( $e$ ), del grado di saturazione ( $S$ ), dei limiti di Atterberg ( $w_l$  e  $w_p$ ); fanno eccezione il campione S1-CI1 prelevato con fustella ed il campione S1-CR4; quest'ultimo caratterizzato da un elevato contenuto della frazione fina (argilla e limo) presente in quantità pari al 20 - 35% in peso.

**Tabella 9 - Analisi granulometrica e proprietà fisiche**

campioni	z	ghiaia	sabbia	limo	argilla	$\gamma$	$\gamma_s$	$\gamma_d$	$\gamma_{sat}$
----------	---	--------	--------	------	---------	----------	------------	------------	----------------

	m	%	%	%	%	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>
S1 CR1	1.5-2.0	49.3	34.0	16.7	-	---	---	---	---
S1 CR2	4.5-5.0	78.8	13	8.2	-	---	---	---	---
S1 CR3	6.0-6.5	62.6	21.6	16	-	---	---	---	---
S1 CR4	9.0-9.5	62.6	23.6	13.8	-	---	---	---	---
S1 CR5	12.0-12.5	50.4	30	19.6	-	---	---	---	---
S1 CR6	19.0-19.5	50.6	31.6	15.8	2.0	---	---	---	---
S1 CR7	24.0-24.5	30.5	41.9	27.6	-	---	---	---	---
S2 CR1	3.0-3.5	72	17.2	10.8	-	---	---	---	---
S2 CR2	4.5-5.0	64.1	22.1	13.8	-	---	---	---	---
S2 CR3	6.0-6.5	61.3	28	10.7	-	---	---	---	---
S2 CR4	9.0-9.5	75	17.5	7.5	-	---	---	---	---
S2 CR5	15.0-15.5	37.9	29.9	21.3	11	---	---	---	---
S2 CR6	18.0-18.5	55.5	27.4	15.1	2	---	---	---	---
S1 PD BS CR1	1.7-2.0	71	20	9	-	---	26.49	---	---
S1 PD BS CR2	5.7-6.0	69	19	12	0	---	26.44	---	---
S1 PD BS CR3	11.7-12.0	59	23	15	3	---	26.36	---	---
S1 PD BS CR4	19.7-20.0	33	48	18	1	---	26.4	---	---
S2 PD BS CR2	7.7-8.0	60	28	11	1	---	26.46	---	---
S2 PD BS CR3	14.7-15.0	39	40	19	2	---	26.42	---	---
S2 PD BS CR4	20.0-20.30	34	31	25	10	---	26.37	---	---

Simboli

z: profondità di prelievo (m) rispetto al boccaforo, assunto coincidente con il p.c.;  $\gamma$ : peso dell'unità di volume; ghiaia, sabbia, limo, argilla: frazioni percentuali delle componenti argillosa, limosa, sabbiosa, ghiaiosa

n.d. = non determinato, in quanto non previsto nel programma di indagini ovvero per la natura del materiale ed il tipo di campionamento (da carota)

**Tabella 10 - Limiti di Atterberg**

campioni	z	w	wl	wp	lp
	m	%		%	%
S1 CR6	19.0-19.5	---	27.4	22.9	4.5
S2 CR5	15.0-15.5	---	35.8	18.3	17.5
S1 PD BS CR1	1.7-2.0	---	---	---	---
S1 PD BS CR2	5.7-6.0	---	---	---	---
S1 PD BS CR3	11.7-12.0	---	23	16	6.8
S1 PD BS CR4	19.7-20.0	---	---	---	---
S2 PD BS CR2	7.7-8.0	---	---	---	---
S2 PD BS CR3	14.7-15.0	---	---	---	---
S2 PD BS CR4	20.0-20.30	---	30	20	10

### Simboli

z: profondità di prelievo (m) rispetto al boccaforo, assunto coincidente con il p.c.; w, w<sub>l</sub>, w<sub>p</sub>: contenuti d'acqua, naturale, al limite di liquidità e di plasticità; IP: indice di plasticità.

---. = non determinato, in quanto non previsto nel programma di indagini ovvero per la natura del materiale ed il tipo di campionamento (da carota).

Per tutti i terreni si adotta il medesimo valore del peso dell'unità di volume  $\gamma$  e della densità di massa  $\rho$ , ponendo  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$  e  $\rho = 1.9 \text{ t/m}^3$ .

### Rigidezza

Nel seguito si riportano i valori della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$  tratti dalla Relazione Indagini Geofisiche (doc.[6]); questi valori sono stati confrontati con quelli determinati utilizzando le correlazioni descritte in precedenza che si basano sulla resistenza da prove penetrometriche dinamiche SPT.

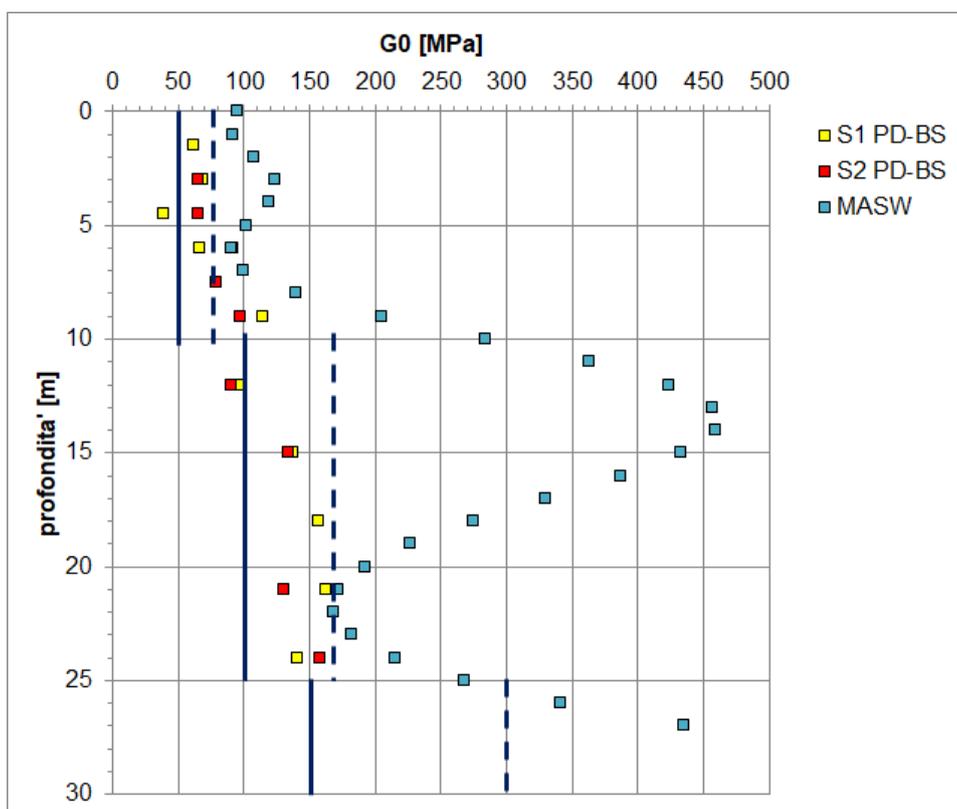
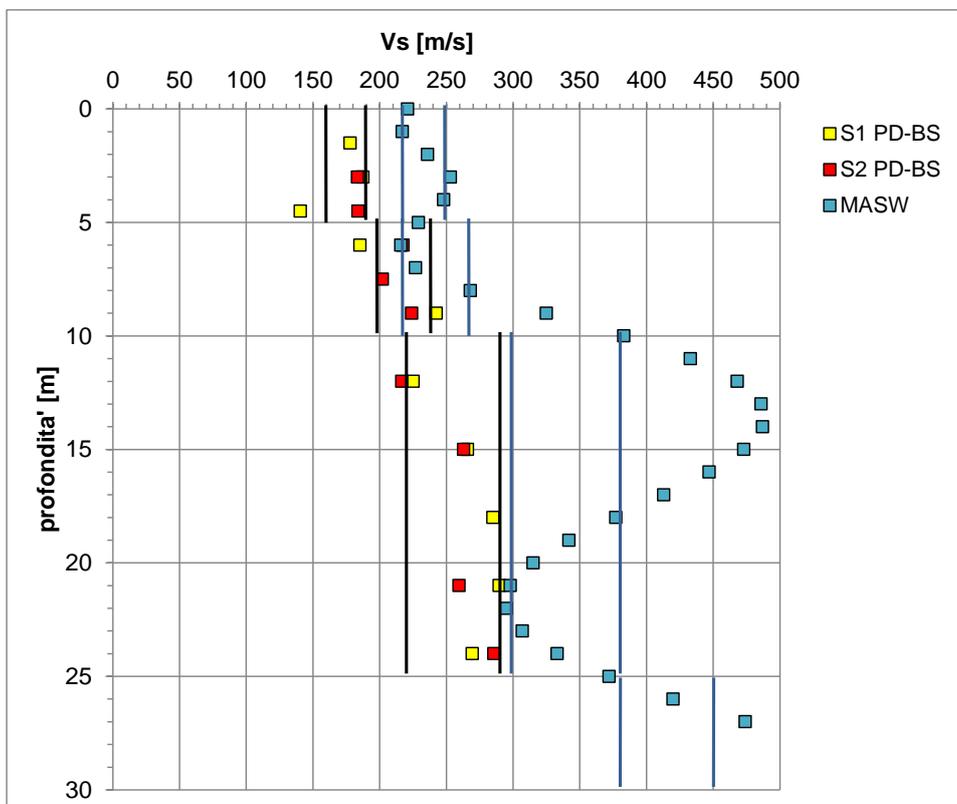
sondaggio S1_PD-BS			sondaggio S2_PD-BS		
Z	V <sub>s</sub>	G <sub>0</sub>	z	V <sub>s</sub>	G <sub>0</sub>
M	m/s	(kPa)	m	m/s	(kPa)
1.5	178	61266	3	183	65191
3	187	68006	4.5	184	65466
4.5	141	38285	6	218	91701
6	185	66529	7.5	202	79066
9	242	113834	9	224	97176
12	225	98088	12	217	90881
15	266	136797	15	263	133990
18	285	157254	21	260	130444
21	290	162464	24	286	158025
24	269	140634			

**Figura 7 – risultati prove Geognostiche**

profondità (m dal p.c.)	V <sub>s</sub> (m/s)	G <sub>0</sub> (kPa)
0	221	94595
1	217	91202
2	236	107872
3	253	123973

4	248	119121
5	229	101568
6	216	90363
7	227	99801
8	268	139109
9	325	204574
10	383	284107
11	433	363129
12	468	424206
13	486	457464
14	487	459349
15	473	433318
16	447	386990
17	413	330358
18	377	275275
19	342	226536
20	315	192179
21	298	171996
22	295	168550
23	307	182541
24	333	214770
25	372	268022
26	420	341651
27	474	435152
28	533	550223
29	594	683372

Figura 8 – risultati prova MASW\_PD-BS



Nella Tabella 11 e nella Tabella 12 sono sintetizzati i risultati delle elaborazioni eseguite sulla base dei dati disponibili.

**Tabella 11 – Intervalli dei valori di  $V_s$  ricavati dalle prove in sito, meccaniche in foro e geofisiche di superficie (penetrometriche dinamiche, MASW).**

Terreni	Unità	z [m]	$V_s$ (1) [m/s]	$V_s$ (2) [m/s]	$V_s$ (3) [m/s]
Ghiaia e sabbia (1)	aa - G(S)	0.0 – 5.0	160 - 190	220 - 250	160 - 200
Ghiaia e sabbia (1)	aa - G(S)	5.0 – 10.0	200 - 240	220 - 270	200 - 250
Ghiaia e sabbia (3)	fg – S(L)	10.0 – 25.0	220 - 290	300 - 380	250 – 350
Ghiaia e sabbia (3)	fg – S(L)	> 25.0	----	380 - 450	400

Simboli –  $V_s$  (1) Ohta e Goto (1978);  $V_s$  (2) MASW;  $V_s$  (3) campo dei valori per la determinazione di  $G_0$  ai fini delle analisi geotecniche.

Ai fini delle analisi geotecniche da eseguire sui rilevati, si farà riferimento ai valori dei moduli di rigidezza dei terreni ricavati dalle prove in sito, meccaniche in foro. Elaborando i dati disponibili si ottiene:

**Tabella 12 – Valori dei parametri di rigidezza ai fini delle analisi geotecniche.**

Terreni	Unità	z [m]	$G_0$ [MPa]	G [MPa]	$E_{cv}$ [MPa]	$E_{ur}$ [MPa]	M [MPa]
Ghiaia e sabbia (1)	aa - G(S)	0.0 – 10.0	50	15	40	50	50
Ghiaia e sabbia (3)	fg – S(L)	10.0 – 25.0	100	30	75	110	100
Ghiaia e sabbia (3)	fg – S(L)	> 25.0	150	50	130	190	175

Simboli -  $G_0$ : modulo di taglio; G: modulo di taglio abbattuto del 30%;  $E_{cv}$ : virgin compression Young's Modulus;  $E_{ur}$ : unload reload Young's Modulus; M oedometric Modulus

### Resistenza a rottura

Di seguito si riportano i valori di angolo di attrito determinati con le correlazioni elencate in precedenza. Per i terreni granulari è stato assunto come valore di progetto l'angolo di attrito determinato con la correlazione di Schmertmann.

I grafici, riportati in Figura 9, mostrano valori relativi ai depositi ghiaiosi più recenti **aa-G(S)** variabili tra  $\varphi' = 37^\circ$  e  $47^\circ$ , con maggiore presenza di punti nell'intervallo  $\varphi' = 37^\circ - 40^\circ$ . I depositi fluvio-glaciali sabbiosi **fg-S(L)** rispondono, invece, con valori variabili tra  $\varphi' = 35^\circ$  e  $43^\circ$ , con maggiore presenza di punti nell'intervallo  $\varphi' = 36^\circ - 38^\circ$ .

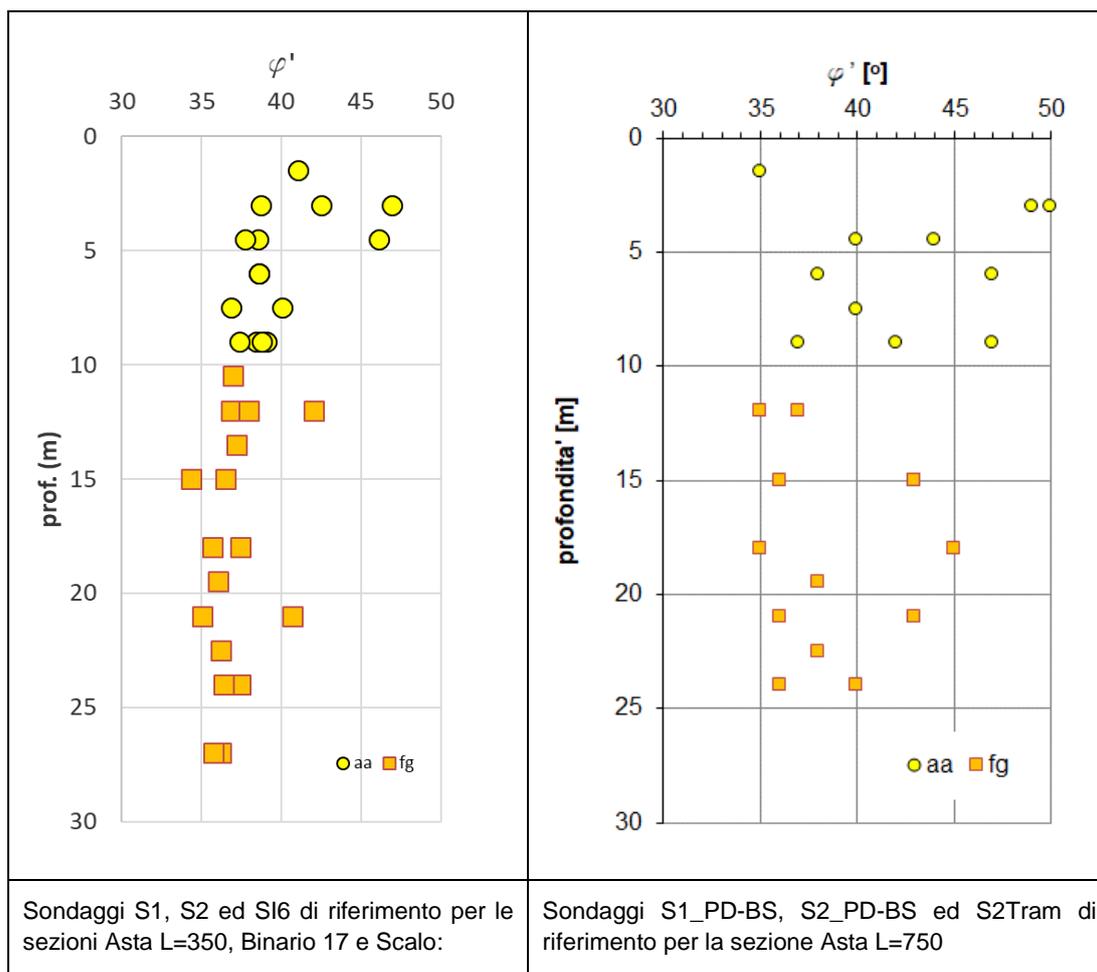


Figura 9 – Unità a grana grossa valori dell'angolo di attrito da correlazione con  $N_{SPT}$  (Schmertmann, 1977).

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 34 di 70

### 8.3 PARAMETRI GEOTECNICI PER TERRENI A GRANA FINE

#### Proprietà fisiche

I valori delle caratteristiche meccaniche dei terreni a grana fina ricavati mediante le prove di laboratorio sono riassunti nelle tabelle seguenti.

**Tabella 13 - Analisi granulometrica e proprietà fisiche dei terreni a grana fine**

campioni	z	ghiaia	sabbia	limo	argilla	$\gamma$	$\gamma_s$	$\gamma_d$	$\gamma_{sat}$
	m	%	%	%	%	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>
S2 PD BS CR1	1.7-2.0	6	21	55	18	n.d.	26.39	n.d.	n.d.
S2 PD BS CI1	17.5-18.0	0	15	70	15	19.3	26.19	15.21	19.32

#### Simboli

z: profondità di prelievo (m) rispetto al boccaforo, assunto coincidente con il p.c.;  $\gamma$ : peso dell'unità di volume; ghiaia, sabbia, limo, argilla: frazioni percentuali delle componenti argillosa, limosa, sabbiosa, ghiaiosa

n.d. = non determinato, in quanto non previsto nel programma di indagini ovvero per la natura del materiale ed il tipo di campionamento (da carota)

**Tabella 14 - Limiti di Atterberg dei terreni a grana fine**

campioni	z	w	w <sub>l</sub>	w <sub>p</sub>	I <sub>p</sub>
	m	%		%	%
S2 PD BS CR1	1.7-2.0	n.d.	31	20	11.3
S2 PD BS CI1	17.5-18.0	26.3	38	24	13.1

#### Simboli

z: profondità di prelievo (m) rispetto al boccaforo, assunto coincidente con il p.c.; w, w<sub>l</sub>, w<sub>p</sub>: contenuti d'acqua, naturale, al limite di liquidità e di plasticità; I<sub>p</sub>: indice di plasticità.

n.d. = non determinato, in quanto non previsto nel programma di indagini ovvero per la natura del materiale ed il tipo di campionamento (da carota)

**Tabella 15 - Valori di OCR da prove penetrometrica dinamica**

unità	z [m] da p.c.	N <sub>SPT</sub>	OCR
aa-A(L)	1.5	8	1
fg-S(L)	18	24	1

Tabella 16 - Valori del coefficiente di consolidazione  $c_v$  ( $m^2/s$ ) in funzione del limite di liquidità

campione	z [m] da testa foro	LL [%]	$C_v$ [ $cm^2/s$ ]
S1 CR3	11.7-12.0	23	$1.2 \cdot 10^{-3}$
S2 CR1	1.7-2.0	31	$1.9 \cdot 10^{-3}$
S2 CI1	17.5-18.0	38	$2.5 \cdot 10^{-3}$
S2 CR1	20.0-20.3	30	$1.8 \cdot 10^{-3}$

### Resistenza a rottura

Per la determinazione dei parametri che definiscono l'involuppo di resistenza al taglio (involuppo lineare, modello di Mohr-Columb) sono state eseguite n.3 prove triassiali consolidate e non drenate; i risultati delle prove, espressi in termini di  $s'$  e  $t'$  (coordinata del centro e raggio del cerchio di rottura) in corrispondenza del picco ed a fine prova, sono riportati nella Figura 10.

Elaborando i risultati delle prove si ricavano valori della coesione efficace  $c'$  e dell'angolo di attrito efficace  $\phi'$  compresi nel campo  $c' = 0.0kPa$  e  $\phi' = 31^\circ - 35^\circ$ . Considerato il problema in esame, si ritiene opportuno, ai fini dei calcoli geotecnici, assumere un valore nullo della coesione efficace  $c'$  ed adottare un valore dell'angolo di attrito  $\phi'$  pari a  $31^\circ$ .

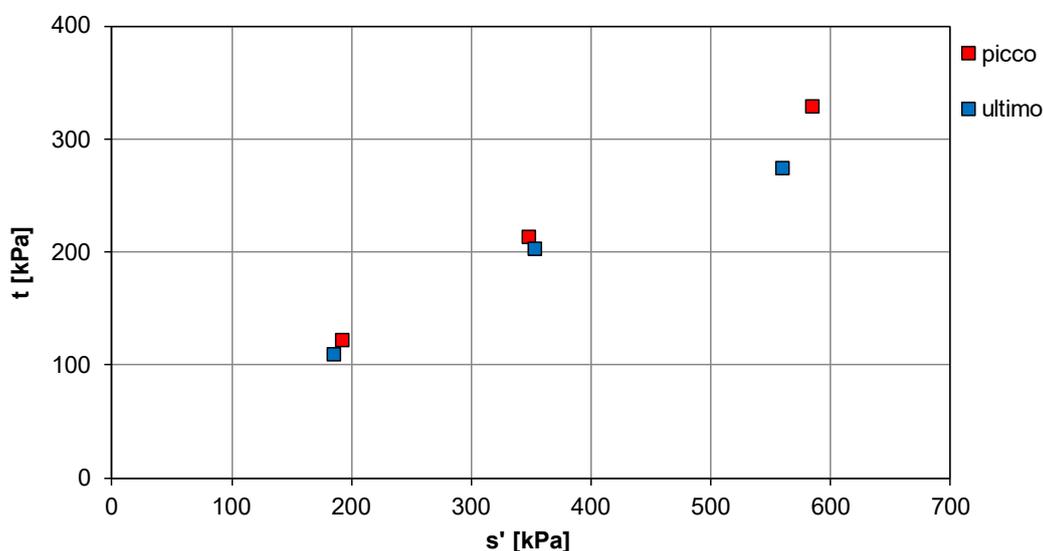


Figura 10 – Risultati prove di laboratorio TxCIU eseguite sul campione S2 CI1 (piano  $t,s'$ )

Non sono disponibili prove di laboratorio triassiale TxUU sui terreni intercettati dai sondaggi, per cui è possibile operare delle valutazioni quantitative solo sul parametro di resistenza non drenata per i terreni a grana fina. I valori di  $c_u$  sono infatti stati ricavati, per l'unità **aa-A(L)** e **fg-A(L)**, dalle misure di *Pocket Penetrometer*. I dati indicano una  $c_u=100-150$  kPa per **aa-A(L)** e

andamento crescente con la profondità per **fg-A(L)**, con valori di  $c_u=50$  KPa a circa 15 metri di profondità e  $c_u=100$  kPa tra 20 e 30 m.

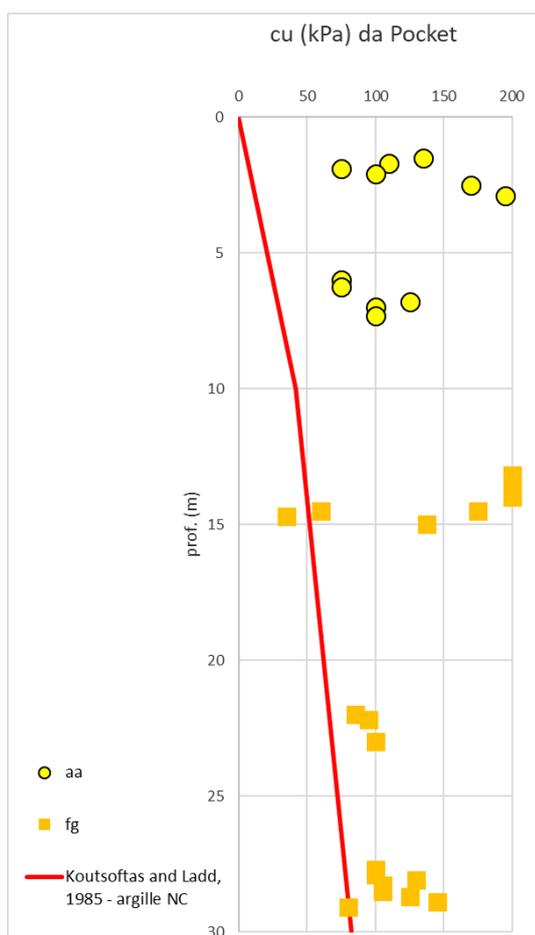


Figura 11 – Unità a grana fina – andamento  $c_u$  e confronto con Koutsoftas e Ladd (1985)

I risultati delle prove penetrometriche SPT possono essere utilizzati per una stima di massima della resistenza al taglio non drenata come indicato di seguito

TERRENI	Profondità di prova z [m]	N SPT	$c_u$ [kPa]	
			Terzaghi - Peck	Stroud
Limi Argillosi Sabbiosi	1.70 – 2.0 (*)	8	-	32
Limi Argillosi Sabbiosi	17.5 - 18.0	24	160	120

(\*) sopra falda

Figura 12 - Resistenza al taglio non drenata  $c_u$  ricavata da prove penetrometriche, SPT.

Nel caso dei terreni a grana fina, le verifiche geotecniche sono state eseguite utilizzando i valori riportati nella Tabella 17 e nella Tabella 18.

**Tabella 17 - Terreni a grana fina: parametri di resistenza al taglio**

Unità	z [m]	c' [kPa]	φ' [°]
aa – A (L)	1.5 – 2.0	0	31
fg – A(L)	16.0-18.0	0	31

**Tabella 18 – Valori dei parametri di rigidità a bassi livelli di deformazione (10<sup>-6</sup>).**

Unità	z [m]	Vs [m/s]	G <sub>0</sub> [MPa]	G [MPa]	E <sub>cv</sub> [MPa]	E <sub>ur</sub> [MPa]	M [MPa]
aa – A (L)	1.5 – 2.0	105	20.1	6.0	15.0	22.0	21.0
fg – A(L)	16.0-18.0	170	29.0	9.0	22.5	33.0	30.5

Simboli - G<sub>0</sub>: modulo di taglio; G: modulo di taglio abbattuto del 30%; E<sub>cv</sub>: virgin compression Young's Modulus; E<sub>ur</sub>: unload reload Young's Modulus; M oedometric Modulus

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAGINE
	IN1M	10	D 26 GE	GE0005001	A	38 di 70

## 8.4 PERMEABILITA` DA PROVE IN SITO LEFRANC

I valori di permeabilità misurati dalle prove LeFranc effettuate durante l'esecuzione dei sondaggi, sono riportati in forma tabellare nella Tabella 19, differenziando le unità geotecniche interessate dalla prova.

L'unità a grana grossa aa-G(s) è caratterizzata da valori di  $k=10^{-5} \div 10^{-4}$  (m/s), mentre le prove del sondaggio S2Tram, entrambe eseguite negli spessori di depositi argilloso-limosi (aa-A(L) e fg-A(L)) hanno fornito permeabilità decisamente più basse, dell'ordine di  $k=10^{-8} \div 10^{-7}$  (m/s).

La prova del sondaggio S1\_PD-BS, entrambe eseguita nella sub-unità sabbiosa fg-S(L) ha fornito permeabilità dell'ordine di  $k=10^{-5}$  (m/s), coerentemente con le caratteristiche granulometriche e la parziale confrontabilità con l'unità grossolana più superficiale.

In Tabella 19: Valori di permeabilità ricavati dalle prove Lefranc, sono riportati i risultati delle prove con l'indicazione del sondaggio e della profondità e quindi della quota a cui sono state eseguite.

**Tabella 19 – Valori di permeabilità ricavati dalle prove Lefranc a carico costante**

Sondaggio	Profondità [m da pc]	k [m/s]	unità
S1	1.5	$4.5 \cdot 10^{-5}$	aa- G(S)
S2	6.0	$8.0 \cdot 10^{-5}$	aa- G(S)
S2_Tram	7.5	$6.47 \cdot 10^{-8}$	aa-A(L))
S2_TRam	15	$9.34 \cdot 10^{-7}$	fg-A(L)
S2_PD-BS	2.0	$3.49 \cdot 10^{-4}$	aa- G(S)
S1_PD-BS	3.5	$2.34 \cdot 10^{-4}$	aa- G(S)
S2_PD-BS	8.0	$6.47 \cdot 10^{-5}$	aa-G(S)
S1_PD-BS	20.0	$2.06 \cdot 10^{-5}$	fg-S

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A

## 8.5 SCHEMA STRATIGRAFICO E PARAMETRI GEOTECNICI DI CALCOLO

Per tutti i terreni si adatterà il medesimo valore del peso dell'unità di volume  $\gamma$  e della densità di massa  $\rho$  ponendo  $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$  e  $\rho = 1.9 \text{ t/m}^3$ .

In sintesi, per l'asta 350 ed il tratto a Nord dell'asta 750, si può assumere:

**Tabella 20 - Schema stratigrafico di calcolo L = 350 m, il Binario 17 e Scalo.**

Terreni	Unità	z [m dal p.c.]	Quota tetto [m s.m.]	Quota base [m s.m.]	Spessore [m]
Ghiaia e sabbia (1)	aa- G(S)	0.0 – 1.5	129.5	128.0	1.5
Limo deb. argilloso (2)	aa-A(L)	1.5 – 2.0	128.0	127.5	0.5
Ghiaia e sabbia (1)	aa- G(S)	2.0 – 10.0	127.5	119.5	8.0
Ghiaia e sabbia (3)	fg -S(L)	10.0-16.0	119.5	113.5	6.0
Limo deb. argilloso (2)	fg-A(L)	16.0-18.0	113.5	111.5	2.0
Ghiaia e sabbia (3)	fg-S(L)	> 18.0	111.5	< 111.5	----

(1) Terreni a grana grossa superiori; (3) Terreni a grana grossa inferiori; (2) Livello di terreni a grana fina;

In sintesi, per il tratto Sud dell'asta 750:

**Tabella 21 - Schema stratigrafico di calcolo tronchino L = 750 m**

Terreni	Unità	z [m]	Quota tetto [m s.m.]	Quota base [m s.m.]	Spessore [m]
Ghiaia e sabbia (1)	aa- G(S)	0.0 – 10.0	129.5	119.5	10.0
Ghiaia e sabbia (3)	fg-S(L)	> 10.0	119.5	< 119.5	----

(1) Terreni a grana grossa superiori; (3) Terreni a grana grossa inferiori

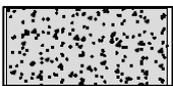
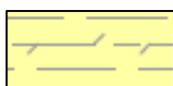
 <b>ITAFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>  <b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
	<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A

**Tabella 22 – Valori caratteristici dei parametri di resistenza al taglio; (1) campo di variabilità; (2) valori di riferimento ai fini del dimensionamento geotecnico delle opere.**

Terreni	Unità	c' (1) [kPa]	φ' (1) [°]	c' (2) [kPa]	φ' (2) [°]
Ghiaia e sabbia (1)	aa - G(S)	0.0	37-47	0.0	39
Ghiaia e sabbia (3)	fg - S(L)	0.0	35-43	0.0	37
Limo deb. argilloso (2)	aa - A(L) fg - A(L)	0.0	31	0.0	31

Nella seguente tabella vengono sintetizzati i principali parametri geotecnici caratteristici dei terreni tipo presenti lungo lo sviluppo del tracciato, stimati sulla base delle correlazioni precedentemente illustrate.

**Tabella 23 - Parametri geotecnici caratteristici, resistenza al taglio e rigidezza.**

Parametri	Rilevato esistente R	Unità aa-G(S)	Unità aa-A(L)	Unità fg-S(L)	Unità fg-A(L)
					
γ (kN/m <sup>3</sup> )	20.0	19.0	19.0	19.0	19.0
φ (°)	38	39	31	37	31
c' (kPa)	0	0	0	0	0
c <sub>u</sub> (kPa)	-	-	100	-	75
E' (MPa)	30	40 - 50	15	75 - 175	15
kw (MN/m <sup>3</sup> )		8	3	15	3
k (m/s)	k=10 <sup>-5</sup>	k=10 <sup>-5</sup> ÷10 <sup>-4</sup>	k=10 <sup>-8</sup> ÷10 <sup>-7</sup>	k=10 <sup>-6</sup> ÷10 <sup>-5</sup>	k=10 <sup>-8</sup> ÷10 <sup>-7</sup>

È opportuno evidenziare che ai fini della scelta dei valori caratteristici dei parametri geotecnici (



LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA

PROGETTO DEFINITIVO  
POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA

**RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE**

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAGINE
IN1M	10	D 26 GE	GE0005001	A	41 di 70

Tabella 22 e Tabella 23), è stato privilegiato un approccio cautelativo, in considerazione delle incertezze nella interpretazione dei risultati delle prove in sito.

## 9 CLASSIFICAZIONE SISMICA DEL SITO

Per quanto concerne la classificazione sismica dell'area oggetto degli interventi si è fatto riferimento all'approccio semplificato che tiene conto delle categorie di sottosuolo come indicato dalla NTC 2018.

La normativa D.M. del 17 gennaio 2018 indica che ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto (punto 3.2.2), deve essere valutata l'influenza delle condizioni litologiche e morfologiche locali sulle caratteristiche del moto del suolo in superficie, mediante studi specifici di risposta sismica locale.

In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio ( $V_s$ ), ottenuti mediante specifiche prove geofisiche.

Per la caratterizzazione sismica dei terreni di fondazione sono stati utilizzati i risultati delle prove MASW ed HVSr eseguite nell'area di progetto, la cui ubicazione è di seguito riportata.

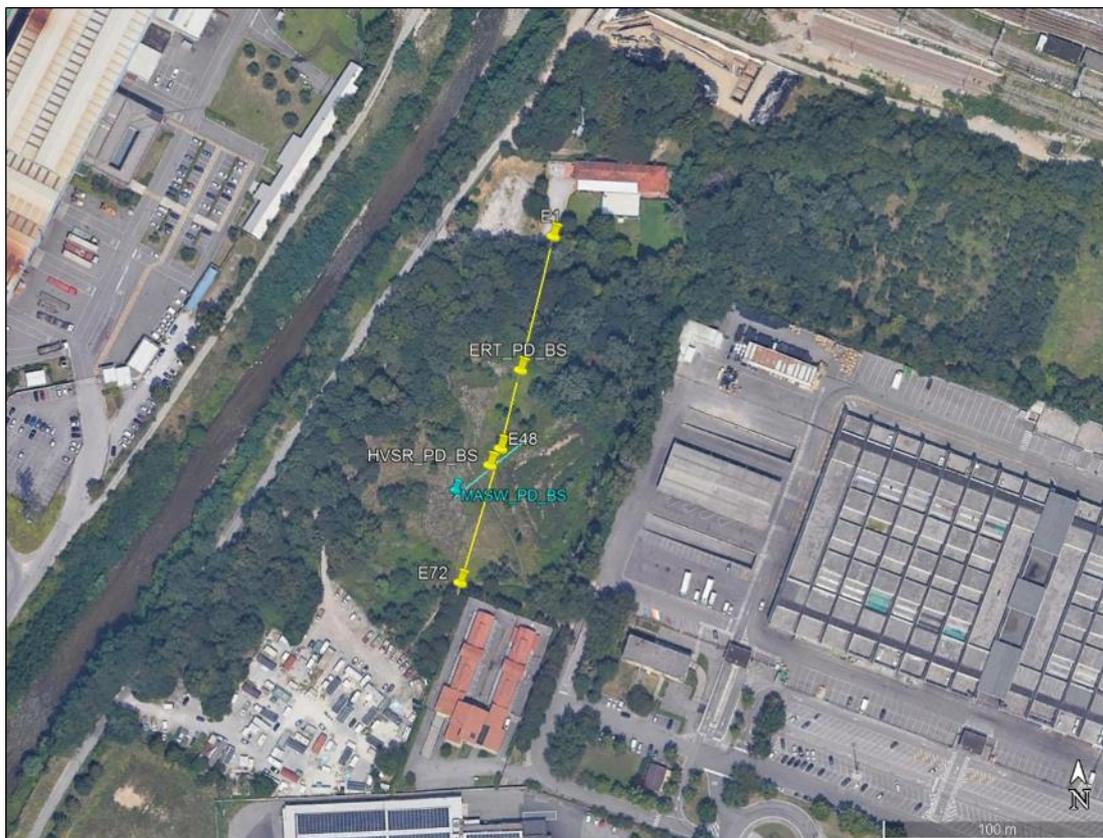


Figura 13: Ubicazione prove MASW e HVSr

	LINEA A.V./A.C.MILANO–VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 43 di 70

Si riporta l'esito delle prove:

Sigla prova	$V_{seq}$ (m/s)	Categoria Sottosuolo		
MASW_PD-BS	326	C		
Sigla prova	Picco rilevato	Frequenza (Hz)	$V_{saver}$ (m/s)	Profondità contatto (m)
HVSR_PD-BS	1	0.81	450	> 130 m
	2	2.38	350	37
	3	8.75	250	7.15

Figura 14: Valori di  $V_s$  per le prove sismiche

Sulla base del profilo di velocità delle onde di taglio  $V_s$  nei primi 30 m dal piano campagna (massima profondità raggiunta), è possibile determinare la velocità equivalente  $V_{s,eq}$ . Il valore calcolato per  $H = 30$  m è pari a  $V_{s,(30)} = 326$  m/s; vista la stratigrafia presente ed il profilo di velocità delle onde di taglio, il sito appartiene alla categoria di sottosuolo di fondazione di riferimento "C".

L'analisi HVSR conferma i valori di velocità, con uno spessore dei depositi alluvionali a circa 10m.

## 9.1 ACCELERAZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE GEOTECNICHE

### 9.1.1 Premessa

L'azione sismica che governa il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di esercizio – SLE e Ultimi - SLU) è qui definita in accordo alle Norme Tecniche 2018 (NTC2018), a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell'azione sismica include le ordinate dello spettro di risposta elastico di accelerazione  $S_e(T)$  corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$  per la vita utile della struttura.

In sintesi, la forma degli spettri di risposta di progetto è definita dai seguenti parametri:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima per sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- $F_0$  valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_c^*$  periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

Nei paragrafi seguenti verrà dapprima stabilito il periodo di riferimento per l'azione sismica, in base alla classificazione delle opere in progetto. Successivamente, verranno definiti gli stati limite di interesse per la verifica strutturale, arrivando a definire i periodi di ritorno

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 44 di 70

corrispondenti dell'azione sismica da considerare, determinata a sua volta per condizioni di suolo rigido ed a livello del piano campagna in corrispondenza di alcuni punti di interesse.

L'inquadramento sismo-tettonico, sismologico dell'area sono oggetto della relazione geologica a cui qui si fa diretto riferimento. Sempre oggetto della relazione geologica è la definizione della categoria di suolo e topografica di riferimento e della magnitudo sempre di riferimento per la verifica a liquefazione.

### 9.1.2 Vita Nominale, Classe d'Uso, Periodo di Riferimento per l'Azione Sismica

La Vita Nominale  $V_N$  di un'opera, intesa come il periodo temporale entro cui l'opera stessa può essere usata per lo scopo al quale è destinata purché soggetta alla manutenzione ordinaria, è così definita dalle NTC2018:

- $V_N \leq 10$  anni, per opere provvisorie e opere provvisionali;
- $V_N \geq 50$  anni, per opere ordinarie, ponti, opere infrastrutturali e dighe di dimensioni contenute o di importanza normale;
- $V_N \geq 100$  anni, per grandi opere, ponti, opere infrastrutturali e dighe di importanza strategica.

Nel caso in esame, ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto è stato assunto in sede progettuale:

$$V_N = 75 \text{ anni}$$

Le opere sono suddivise dalle NTC2018 in classi d'uso, la cui appartenenza è stabilita sulla base dell'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico. In particolare, le classi d'uso sono così definite:

- Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli. Per le quali si ha un coefficiente d'uso  $C_U = 0.7$ .
- Classe II: ... omissis ... Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso III o Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso III o IV, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza ... omissis .... Per le quali  $C_U = 1.0$ .
- Classe III: ... omissis ... Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV, salvo casi particolari per i quali sia necessaria la classe d'uso IV, e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza ... omissis ... Per le quali  $C_U = 1.5$ .
- Classe IV: ... omissis ... Reti viarie di tipo A o B, di cui al DM 5/11/2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade" e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico ... omissis ... Per le quali  $C_U = 2$ .

Nel caso in esame si assume:

	LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 45 di 70

Classe d'uso III ( $C_U = 1.5$ ) per i rilevati

Classe d'uso IV ( $C_U = 2.0$ ) per i fabbricati

Pertanto, nel caso in esame, l'azione sismica di verifica viene associata ad un periodo di riferimento  $V_R$  pari a:

$$V_R = V_N \times C_U = 75 \times 1.5 = 112.5 \text{ anni per i rilevati}$$

$$V_R = V_N \times C_U = 75 \times 2.0 = 150 \text{ anni per i fabbricati}$$

### 9.1.3 Stati limite e relative probabilità di superamento

L'azione sismica di progetto deve essere determinata in funzione degli Stati Limite di verifica ed alle corrispondenti probabilità  $P_{VR}$  di realizzarsi nel periodo di riferimento  $V_R$  sopra definito.

Gli Stati Limite di riferimento per verifiche in presenza di sisma, così come definiti nelle NTC2018 al par. 3.2.1 sono:

- Stato Limite Ultimo (SLU):
  - Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, SLV, definito come lo stato limite in corrispondenza del quale la struttura subisce una significativa perdita della rigidità nei confronti dei carichi orizzontali ma non nei confronti dei carichi verticali. Permane un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.
  - Stato Limite di Prevenzione del Collasso, SLC, stato limite nel quale la struttura subisce gravi danni strutturali, mantenendo comunque un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza a collasso per carichi orizzontali.
- Stato limite di Esercizio (SLE):
  - Stato Limite di immediata Operatività SLO per le strutture ed apparecchiature che debbono restare operative a seguito dell'evento sismico.
  - Stato Limite di Danno SLD definito come lo stato limite da rispettare per garantire la sostanziale integrità dell'opera ed il suo immediato utilizzo.

Il tempo di ritorno  $T_R$  dell'azione sismica di verifica è legato al periodo di riferimento  $V_R$  ed alla probabilità di superamento  $P_{VR}$  dalla relazione:

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	PAGINE
	IN1M	10	D 26 GE	GE0005001	A	46 di 70

I valori di periodo di ritorno dell'azione sismica, per i diversi Stati Limite e classi d'uso delle strutture sono riportati in Tabella 24.

STATO LIMITE	$T_R$ , anni
SLO	68
SLD	113
SLV	1068
SLC	2193

Tabella 24 - Periodi di ritorno per l'azione sismica di progetto, per i diversi stati limite.

#### 9.1.4 Accelerazione di Riferimento su Suolo Rigido

In allegato alle NTC2018, i valori  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  sono forniti per ognuno dei 10751 nodi di un reticolo di riferimento che copre il territorio nazionale. I valori corrispondenti a punti intermedi ai nodi di griglia si ottengono per interpolazione sui quattro punti adiacenti. Per definire i valori della pericolosità sismica di base, in questa fase è stata selezionata l'opzione di scelta "per Comune" sul foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v.1.0.3b distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2009), selezionando le coordinate definite per la verticale di indagini S1\_PD-BS.

In Tabella 25 sono riportati i valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  per classe di uso III:

Tabella 25 - Valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$ , per il sito investigato (BS Scalo) e classe di uso III.

#### Valori dei parametri $a_g$ , $F_0$ , $T_C^*$ per i periodi di ritorno $T_R$ associati a ciascuno SL

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	68	0,063	2,436	0,246
SLD	113	0,081	2,421	0,258
SLV	1068	0,195	2,453	0,287
SLC	2193	0,249	2,445	0,297

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

In Tabella 26 sono riportati i valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_C^*$  per classe di uso IV:

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO</b> <b>POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 47 di 70

Tabella 26 - Valori di  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_c^*$ , per il sito investigato (BS Scalo) e classe di uso III.

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_0$ [-]	$T_c^*$ [s]
SLO	90	0.073	2.452	0.255
SLD	151	0.093	2.418	0.262
SLV	1898	0.223	2.435	0.285
SLC	2475	0.271	2.425	0.292

### 9.1.5 Risposta Sismica Locale

Per i fini del presente studio, gli effetti di amplificazione stratigrafica e topografica sono stati valutati sulla base delle indicazioni delle NTC2018, le quali definiscono un fattore di sito  $S$  di amplificazione sismica come funzione sia della categoria di sottosuolo ( $S_s$ ), sia dell'andamento della superficie topografica (attraverso il coefficiente  $S_T$ ):

$$S = S_s \cdot S_T$$

In particolare, il sottosuolo viene categorizzato a fini sismici in base alla velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  (in m/s) definita come:

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

dove:

- $h_i$  = spessore dell' $i$ -esimo strato;
- $V_{s,i}$  = valore di velocità delle onde di taglio nell' $i$ -esimo strato;
- $N$  = numero di strati.
- $H$  = profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s.

I risultati delle prove MASW richiamate forniscono valori di  $V_{s,30}$  sempre riferibili alla classe di sottosuolo C (MASW1:  $V_{s30}=324$  m/s; MASW4:  $V_{s30}=304$  m/s; MASW5:  $V_{s30}=300$  m/s; MASW\_PD-BS:  $V_{s30}=326$  m/s), per cui si farà nel seguito riferimento a tale categoria suggerendo comunque approfondimenti per la fasi progettuali successive.

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, sempre sulla base delle informazioni fornite nella Relazione Geologica, il tracciato corre all'interno di un sito sostanzialmente pianeggiante e viene classificato in categoria topografica T1 (Superficie pianeggiante e rilievi isolati con

 <b>ITALFERR</b> GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	<b>LINEA A.V./A.C.MILANO-VERONA</b>					
	<b>PROGETTO DEFINITIVO          POTENZIAMENTO INFRASTRUTTURALE DELLO SCALO DI BRESCIA</b>					
<b>RELAZIONE GEOTECNICA GENERALE</b>	COMMESSA IN1M	LOTTO 10	CODIFICA D 26 GE	DOCUMENTO GE0005001	REV. A	PAGINE 48 di 70

inclinazione media  $i \leq 15^\circ$ , v. Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

Il fattore di sito  $S$  e l'azione sismica di progetto  $a_{max} = S \cdot a_g$  ottenuti per il sito investigato e per i diversi periodi di ritorno sono riportati in Tabella 27.

**Tabella 27 - Valori dei coefficienti di sito  $S$  e dell'accelerazione di progetto  $a_{max}$**

SL	$T_R$ (anni)	$a_g$ (g)	$S$ (-)	$a_{max}$ (g)
SLO	68	0.063	1.5	0.095
SLD	113	0.081	1.5	0.122
SLV	1068	0.195	1.413	0.276
SLC	2193	0.249	1.335	0.332

### 9.1.6 Coefficienti sismici per le verifiche di stabilità dei rilevati

Le verifiche di stabilità verranno condotte mediante il metodo pseudo-statico seguendo le modalità indicate in Normativa Vigente, nel quale, in mancanza di studi specifici, i coefficienti sismici  $k_h$  (orizzontale) e  $k_v$  (verticale) sono calcolati come:

$$k_h = \beta_s \cdot a_{max} / g$$

$$k_v = +/- k_h / 2$$

essendo:

$a_{max}$  = azione sismica di progetto definita in Tabella 27 , pari a 0.276 g.

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, da assumere pari a 0.38 per verifiche allo SLV su fronti di scavo o rilevati, come nel caso in oggetto.

In accordo alle espressioni di cui sopra, si ottengono i seguenti coefficienti per la verifica di stabilità globale allo SLV (Tabella 28), considerando che il tracciato ricade terreno di tipo C.

**Tabella 28 - Valori dei coefficienti sismici per le verifiche di stabilità globale**

	$V_N$	$C_U$	$V_R$	$a_g$ (g)	$S$	$S_T$	$a_{max}$ (g)	$k_h$	$k_v$
SLV	75	1.5	112.5	0.195	1.413	1.0	0.276	0.105	+/-0.052

## 10 STABILITA` NEI CONFRONTI DELLA LIQUEFAZIONE

In terreni saturi sabbiosi sollecitati, in condizioni non drenate, da azioni cicliche dinamiche, il termine liquefazione comprende una serie di fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche. L'avvenuta liquefazione si manifesta, in presenza di manufatti, attraverso la perdita di capacità portante e/o lo sviluppo di elevati cedimenti e rotazioni.

In base a NTC18, la verifica di liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanza:

- accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti minori di 0.1g;
- profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
- depositi costituiti da sabbie pulite, con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$ , dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza, determinata in prove penetrometriche dinamiche (SPT), normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa, e  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza, determinata in prove penetrometriche statiche (CPT), normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
- distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nel grafico a), nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  e nel grafico b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ .

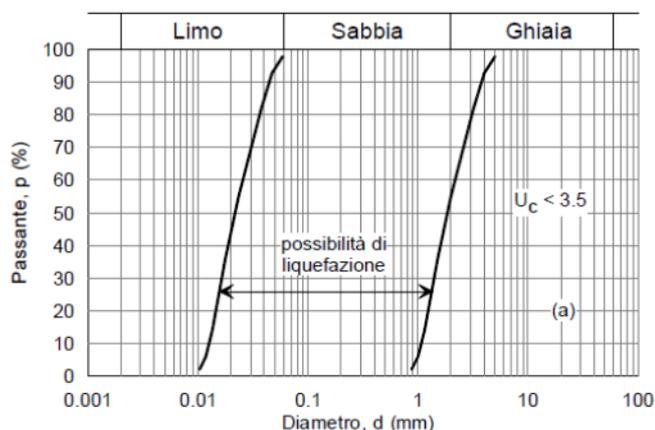


Figura 15: gráfico a) per terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$

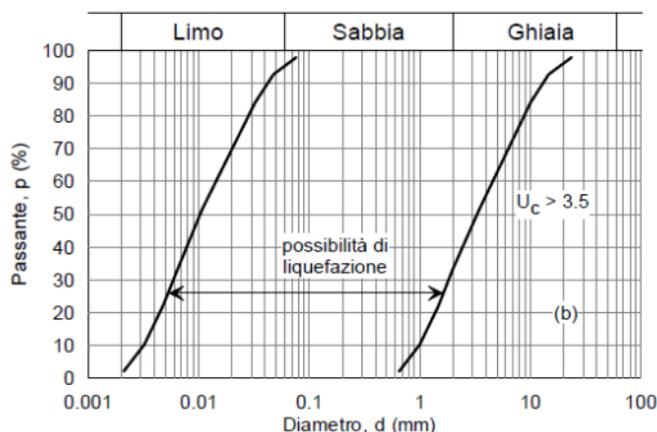


Figura 16: gráfico b) per terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$

La verifica a liquefazione viene effettuata confrontando i rapporti di sollecitazione ciclica (CSR) indotti dal terremoto con i rapporti di resistenza ciclica (CRR) del suolo:

$$FS = \frac{CSR}{CRR}$$

Il CSR indotto dal terremoto, ad una data profondità,  $z$ , all'interno del profilo del suolo, è solitamente espresso come un valore rappresentativo (o valore uniforme equivalente) pari al 65% del massimo rapporto di sollecitazione di taglio ciclico, ovvero:

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v}$$

dove  $\tau_{max}$  è lo sforzo di taglio massimo indotto dal terremoto,  $\sigma'_v$  è lo sforzo effettivo verticale, e i pedici sulla CSR indicano che è calcolata per una specifica magnitudo del terremoto (magnitudo del momento,  $M$ ) e in-situ  $\sigma'_v$ .

La sollecitazione di taglio massima può essere stimata utilizzando l'equazione, sviluppata come parte della procedura di liquefazione semplificata Seed-Idriss, che è espressa come:

$$CSR_{M,\sigma'_v} = 0.65 \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \frac{a_{max}}{g} r_d$$

dove  $\sigma_v$  è la sollecitazione verticale totale alla profondità  $z$ ,  $a_{max}/g$  è l'accelerazione orizzontale massima (come frazione della gravità) alla superficie del suolo e  $r_d$  è il fattore di riduzione della sollecitazione di taglio che tiene conto della risposta dinamica del profilo del suolo.

Il CRR del suolo è solitamente correlato a un parametro in situ come il numero dei colpi SPT.

$$(N_1)_{60} = C_N C_E C_R C_B C_S N_{SPT}$$

dove  $C_N$  è un fattore di correzione del terreno di copertura,  $C_E = ER_m/60\%$ ,  $ER_m$  è il valore misurato dell'energia erogata come percentuale dell'energia teorica del martello a caduta libera,  $C_R$  è un fattore di correzione dell'asta che tiene conto del fatto che l'energia diminuisce per lunghezze di aste più corte,  $C_B$  è un fattore di correzione per diametri di foro non standard,  $C_S$  è un fattore di correzione relativo al metodo di campionamento, e  $N_{SPT}$  è il numero di colpi SPT misurati. I fattori  $C_B$  e  $C_S$  sono pari all'unità se vengono adoperate procedure standard.

Il CRR del suolo è anche influenzato dalla durata del sisma (che è correlato al fattore di scala della magnitudo del terremoto, MSF che in accordo alle prescrizioni dell'Eurocodice 8 Parte 5, è da assumere cautelativamente pari a 2.2) e dalle tensioni agenti (che è espresso attraverso un fattore K).

La correlazione per il CRR è quindi sviluppata per un riferimento  $M = 7.5$  e  $\sigma'_v = 1$  atm e poi regolata

ad altri valori di M e  $\sigma'_v$  utilizzando la seguente espressione:

$$CRR_{M,\sigma'_v} = CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} \cdot MSF \cdot K_\sigma$$

Il CRR del suolo è inoltre influenzato anche dalla presenza di tensioni di taglio statiche sostenute, come quelle che possono esistere sotto le fondazioni o all'interno dei pendii. Questo effetto, che è espresso attraverso un fattore K, è generalmente piccolo per condizioni di terreno quasi livellato.

La correlazione tra CRR e  $(N_1)_{60}$  è influenzata dal contenuto di particelle fini (FC), infatti:

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = f[(N_1)_{60}, FC]$$

La correlazione tra il rapporto di resistenza ciclica (CRR), ad  $M = 7.5$  e  $\sigma'_v = 1$  atm, e il valore equivalente di sabbia pulita  $(N_1)_{60cs}$  per terreni senza coesione, sviluppata da Idriss e Boulanger (2004, 2008), è:

$$CRR_{M=7.5,\sigma'_v=1} = \exp\left(\frac{(N_1)_{60cs}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60cs}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right)$$

Valutato il fattore di sicurezza FS si valuta l'Indice di potenziale alla liquefazione (IPL) come segue:

$$IPL = L_s = \int_0^{z_{crit}} F(z) \cdot w(z) \cdot dz$$

Dove  $w(z)$  e  $F(z)$  sono, rispettivamente:

$$w(z) = 10 - z/2$$

$$\text{Con } F(z) = \begin{cases} 0 & \text{per } FS > 1.2 \\ 2 \cdot 10^6 e^{-18.427 \cdot FS} & \text{per } 0.95 \leq FS \leq 1.4 \\ 1 - FS & \text{per } FS \leq 0.95 \end{cases}$$

Nel caso in esame la verifica è stata effettuata nelle seguenti ipotesi:

- discretizzazione della stratigrafia di calcolo in  $\Delta z=0.20$  m;
- falda a piano campagna;
- Accelerazione  $a_{max}= 0.342$ ;
- Magnitudo  $M=4.84$ ;
- $\beta=0.65$ ;
- $r_d$  calcolato con formulazione di Idriss & Boulanger.

Il valore di  $L_s$  ottenuto è quindi stato confrontato con la tabella di letteratura (Somnez & Gokceoglu, 2007), di seguito riportata, che fornisce il rischio di liquefazione per il banco di terreno esaminato.

$L_s$	Descrizione
$85 \leq L_s \leq 100$	Molto alto
$65 \leq L_s \leq 85$	Alto
$35 \leq L_s \leq 65$	Moderato
$15 \leq L_s \leq 35$	Basso
$0 \leq L_s \leq 15$	Molto basso
$L_s = 0$	Non liquefacibile

Nella seguente tabella sono sinteticamente riportati i risultati delle verifiche alla liquefazione effettuate sulle stratigrafie dei sondaggi S1 ed S2, S1\_PD-BS ed S2\_PD-BS.

	<b>L<sub>s</sub></b> [-]	<b>Rischio Liquefazione</b>
S1	0	NON LIQUEFACIBILE
S2	0	NON LIQUEFACIBILE
S1_PD-BS	0	NON LIQUEFACIBILE
S2_PD-BS	0	NON LIQUEFACIBILE

Per la verifica integrale si rimanda all'allegato.

## 11 ALLEGATO A- VERIFICHE LIQUEFAZIONE

### SONDAGGIO S1

Di seguito si riportano le curve granulometriche confrontate con le curve limite date da norma, i valori di  $N_{1,60}$  derivanti dalle prove in sito e del contenuto in fine derivanti dalle prove di laboratorio.

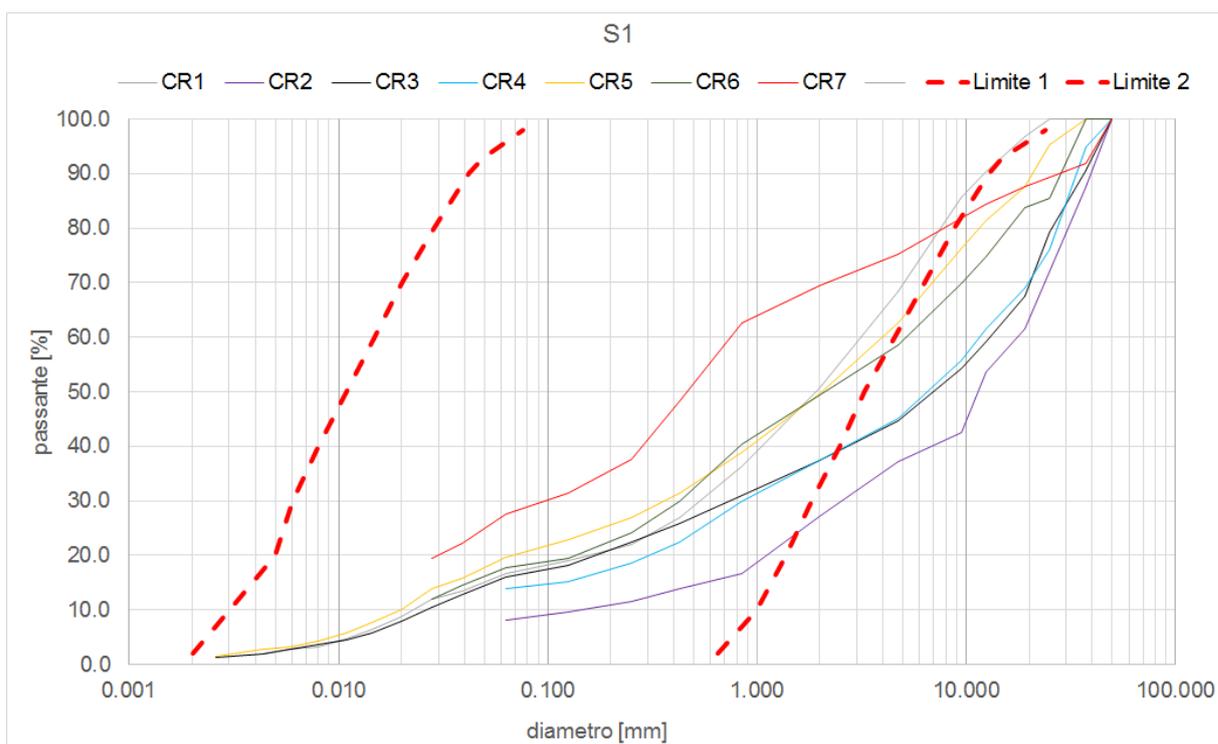


Figura 17 - Fusi granulometrici da campioni di S1.

Z <sub>camp</sub>	$\sigma'_v$	$N_{1,60}$
[m]	[kPa]	[-]
1,5	28,5	34
3	57	51
6	114	26
7,5	142,5	41
9	171	29
12	228	34
15	259	34
18	286	30
21	313	27
24	340	52
27	367	42

Tabella 29 – Valori  $N_{1,60}$  ricavati da SPT eseguite in S1.

z	z <sub>i</sub>	FC
[m]	[m]	[-]
1,50 - 2,0	1,7	16,70
4,5 - 5,0	4,7	8,20
6,0-6,5	6,2	16,00
9,0-9,5	9,2	13,80
12,0-12,5	12,2	19,60
19,0-19,5	19,2	17,80
24-24,5	24,2	27,60

Tabella 30 – Contenuto fine presente in campioni S1.

Di seguito si riporta il tabulato della verifica di suscettibilità alla liquefazione

Verifica	profondità	Idriss & Boulanger				FC	(N <sub>1</sub> ) <sub>60cs</sub>	MSF	C <sub>σ</sub>	K <sub>σ</sub>	azione resistenza			
		σ' <sub>v0</sub>	r <sub>d</sub>	τ <sub>eq</sub>	CSR <sub>M,σv</sub>						CSR <sub>M=4.84,σv=1</sub>	CRR <sub>M=4.84,σv=1</sub>	FS	L <sub>s</sub>
[-]	[m]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
no	0.20	3.80	1.01	0.85	0.224	16.70	37.77	2.50	0.30	1.10	0.08	2.14E+00	2.63E+01	0.00
no	0.40	7.60	1.00	1.69	0.223	16.70	74.77	2.50	-0.32	0.18	0.49	1.10E+20	2.25E+20	0.00
no	0.60	11.40	1.00	2.53	0.222	16.70	74.77	2.50	-0.32	0.31	0.29	1.10E+20	3.86E+20	0.00
no	0.80	15.20	0.99	3.36	0.221	16.70	74.77	2.50	-0.32	0.40	0.22	1.10E+20	5.02E+20	0.00
no	1.00	19.00	0.99	4.18	0.220	16.70	74.77	2.50	-0.32	0.47	0.19	1.10E+20	5.93E+20	0.00
no	1.20	22.80	0.99	5.00	0.219	16.70	74.77	2.50	-0.32	0.53	0.17	1.10E+20	6.68E+20	0.00
no	1.40	26.60	0.98	5.80	0.218	16.70	74.77	2.50	-0.32	0.58	0.15	1.10E+20	7.33E+20	0.00
no	1.60	30.40	0.98	6.60	0.217	16.70	46.77	2.50	0.30	1.10	0.08	7.89E+01	1.00E+03	0.00
no	1.80	34.20	0.97	7.39	0.216	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	1.92E+02	0.00
no	2.00	38.00	0.97	8.17	0.215	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	193.05	0.00
no	2.20	41.80	0.96	8.94	0.214	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	194.02	0.00
no	2.40	45.60	0.96	9.71	0.213	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	195.01	0.00
no	2.60	49.40	0.95	10.46	0.212	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	196.03	0.00
no	2.80	53.20	0.95	11.21	0.211	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	197.08	0.00
no	3.00	57.00	0.94	11.94	0.210	8.20	43.43	2.50	0.30	1.10	0.08	15.09	198.17	0.00
no	3.20	60.80	0.94	12.67	0.208	8.20	5.43	1.15	0.08	1.04	0.17	0.09	0.51	0.00
no	3.40	64.60	0.93	13.38	0.207	8.20	5.43	1.15	0.08	1.03	0.17	0.09	0.51	0.00
no	3.60	68.40	0.93	14.09	0.206	8.20	5.43	1.15	0.08	1.03	0.17	0.09	0.51	0.00
no	3.80	72.20	0.92	14.78	0.205	8.20	5.43	1.15	0.08	1.03	0.17	0.09	0.51	0.00
no	4.00	76.00	0.92	15.47	0.203	8.20	5.43	1.15	0.08	1.02	0.17	0.09	0.51	0.00
no	4.20	79.80	0.91	16.14	0.202	8.20	5.43	1.15	0.08	1.02	0.17	0.09	0.51	0.00
no	4.40	83.60	0.90	16.80	0.201	8.20	5.43	1.15	0.08	1.01	0.17	0.09	0.51	0.00
no	4.60	87.40	0.90	17.45	0.200	8.20	18.43	1.54	0.13	1.02	0.13	0.19	1.48	0.00
no	4.80	91.20	0.89	18.10	0.198	16.00	21.58	1.70	0.14	1.01	0.12	0.23	1.97	0.00
no	5.00	95.00	0.89	18.73	0.197	16.00	21.58	1.70	0.14	1.01	0.12	0.23	1.97	0.00
no	5.20	98.80	0.88	19.35	0.196	16.00	21.58	1.70	0.14	1.00	0.12	0.23	1.97	0.00
no	5.40	102.60	0.87	19.95	0.194	16.00	21.58	1.70	0.14	1.00	0.11	0.23	1.97	0.00
no	5.60	106.40	0.87	20.55	0.193	16.00	21.58	1.70	0.14	0.99	0.11	0.23	1.98	0.00
no	5.80	110.20	0.86	21.14	0.192	16.00	21.58	1.70	0.14	0.99	0.11	0.23	1.98	0.00
no	6.00	114.00	0.86	21.71	0.190	16.00	21.58	1.70	0.14	0.98	0.11	0.23	1.99	0.00

no	6.20	117.80	0.85	22.28	0.189	16.00	57.58	2.50	-2.23	1.10	0.07	6.42E+05	9.35E+06	0.00
no	6.40	121.60	0.84	22.83	0.188	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.05E+06	0.00
no	6.60	125.40	0.84	23.37	0.186	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.08E+06	0.00
no	6.80	129.20	0.83	23.90	0.185	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.11E+06	0.00
no	7.00	133.00	0.83	24.42	0.184	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.14E+06	0.00
no	7.20	136.80	0.82	24.93	0.182	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.17E+06	0.00
no	7.40	140.60	0.81	25.42	0.181	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.20E+06	0.00
no	7.60	144.40	0.81	25.91	0.179	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.07	2.76E+05	4.24E+06	0.00
no	7.80	148.20	0.80	26.38	0.178	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.27E+06	0.00
no	8.00	152.00	0.79	26.85	0.177	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.30E+06	0.00
no	8.20	155.80	0.79	27.30	0.175	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.34E+06	0.00
no	8.40	159.60	0.78	27.74	0.174	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.37E+06	0.00
no	8.60	163.40	0.78	28.17	0.172	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.41E+06	0.00
no	8.80	167.20	0.77	28.59	0.171	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.44E+06	0.00
no	9.00	171.00	0.76	29.00	0.170	13.80	56.83	2.50	-3.09	1.10	0.06	2.76E+05	4.48E+06	0.00
no	9.20	174.80	0.76	29.40	0.168	13.80	27.83	2.09	0.18	0.90	0.09	0.38	4.20	0.00
no	9.40	178.60	0.75	29.79	0.167	19.60	29.41	2.20	0.20	0.89	0.09	0.45	5.27	0.00
no	9.60	182.40	0.74	30.17	0.165	19.60	29.41	2.20	0.20	0.88	0.09	0.45	5.29	0.00
no	9.80	186.20	0.74	30.54	0.164	19.60	29.41	2.20	0.20	0.88	0.08	0.45	5.31	0.00
no	10.00	190.00	0.73	30.90	0.163	19.60	29.41	2.20	0.20	0.87	0.08	0.45	5.33	0.00
no	10.20	193.80	0.73	31.25	0.161	19.60	29.41	2.20	0.20	0.87	0.08	0.45	5.35	0.00
no	10.40	197.60	0.72	31.59	0.160	19.60	29.41	2.20	0.20	0.87	0.08	0.45	5.37	0.00
no	10.60	201.40	0.71	31.92	0.158	19.60	29.41	2.20	0.20	0.86	0.08	0.45	5.40	0.00
no	10.80	205.20	0.71	32.24	0.157	19.60	29.41	2.20	0.20	0.86	0.08	0.45	5.42	0.00
no	11.00	209.00	0.70	32.55	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.85	0.08	0.45	5.45	0.00
no	11.20	210.80	0.69	32.85	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.85	0.08	0.45	5.43	0.00
no	11.40	212.60	0.69	33.14	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.85	0.08	0.45	5.42	0.00
no	11.60	214.40	0.68	33.42	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.85	0.08	0.45	5.41	0.00
no	11.80	216.20	0.68	33.70	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.85	0.08	0.45	5.40	0.00
no	12.00	218.00	0.67	33.96	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.85	0.08	0.45	5.39	0.00
no	12.20	219.80	0.66	34.22	0.156	19.60	29.41	2.20	0.20	0.84	0.08	0.45	5.38	0.00
no	12.40	221.60	0.66	34.47	0.156	17.80	29.05	2.18	0.19	0.85	0.08	0.43	5.10	0.00
no	12.60	223.40	0.65	34.71	0.155	17.80	29.05	2.18	0.19	0.84	0.08	0.43	5.10	0.00
no	12.80	225.20	0.65	34.95	0.155	17.80	29.05	2.18	0.19	0.84	0.08	0.43	5.10	0.00
no	13.00	227.00	0.64	35.18	0.155	17.80	29.05	2.18	0.19	0.84	0.08	0.43	5.09	0.00
no	13.20	228.80	0.63	35.39	0.155	17.80	29.05	2.18	0.19	0.84	0.08	0.43	5.09	0.00
no	13.40	230.60	0.63	35.61	0.154	17.80	29.05	2.18	0.19	0.84	0.08	0.43	5.09	0.00
no	13.60	232.40	0.62	35.81	0.154	17.80	29.05	2.18	0.19	0.84	0.08	0.43	5.09	0.00
no	13.80	234.20	0.62	36.01	0.154	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.10	0.00
no	14.00	236.00	0.61	36.20	0.153	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.10	0.00
no	14.20	237.80	0.61	36.38	0.153	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.10	0.00
no	14.40	239.60	0.60	36.56	0.153	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.11	0.00
no	14.60	241.40	0.60	36.73	0.152	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.11	0.00
no	14.80	243.20	0.59	36.90	0.152	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.12	0.00
no	15.00	245.00	0.58	37.06	0.151	17.80	29.05	2.18	0.19	0.83	0.08	0.43	5.13	0.00
no	15.20	246.80	0.58	37.21	0.151	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.13	0.00
no	15.40	248.60	0.57	37.36	0.150	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.14	0.00
no	15.60	250.40	0.57	37.51	0.150	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.15	0.00
no	15.80	252.20	0.56	37.64	0.149	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.16	0.00
no	16.00	254.00	0.56	37.78	0.149	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.17	0.00
no	16.20	255.80	0.55	37.91	0.148	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.18	0.00
no	16.40	257.60	0.55	38.03	0.148	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.19	0.00

no	16.60	259.40	0.54	38.15	0.147	17.80	29.05	2.18	0.19	0.82	0.08	0.43	5.20	0.00
no	16.80	261.20	0.54	38.27	0.147	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.21	0.00
no	17.00	263.00	0.53	38.38	0.146	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.23	0.00
si	17.20	264.80	0.53	38.49	0.145	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.24	0.00
si	17.40	266.60	0.53	38.59	0.145	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.25	0.00
si	17.60	268.40	0.52	38.69	0.144	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.26	0.00
si	17.80	270.20	0.52	38.79	0.144	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.28	0.00
si	18.00	272.00	0.51	38.89	0.143	17.80	29.05	2.18	0.19	0.81	0.08	0.43	5.29	0.00
si	18.20	273.80	0.51	38.98	0.142	17.80	29.05	2.18	0.19	0.80	0.08	0.43	5.30	0.00
si	18.40	275.60	0.50	39.07	0.142	17.80	29.05	2.18	0.19	0.80	0.08	0.43	5.32	0.00
si	18.60	277.40	0.50	39.16	0.141	17.80	29.05	2.18	0.19	0.80	0.08	0.43	5.33	0.00
si	18.80	279.20	0.49	39.24	0.141	17.80	29.05	2.18	0.19	0.80	0.08	0.43	5.35	0.00
si	19.00	281.00	0.49	39.32	0.140	17.80	29.05	2.18	0.19	0.80	0.08	0.43	5.36	0.00
si	19.20	282.80	0.49	39.41	0.139	17.80	29.05	2.18	0.19	0.80	0.08	0.43	5.38	0.00
si	19.40	284.60	0.48	39.48	0.139	27.60	30.25	2.27	0.21	0.79	0.08	0.50	6.43	0.00
si	19.60	286.40	0.48	39.56	0.138	27.60	30.25	2.27	0.21	0.78	0.08	0.50	6.45	0.00
si	19.80	288.20	0.47	39.64	0.138	27.60	30.25	2.27	0.21	0.78	0.08	0.50	6.46	0.00
si	20.00	290.00	0.47	39.71	0.137	27.60	30.25	2.27	0.21	0.78	0.08	0.50	6.48	0.00

I risultati riportati in tabella sono di seguito sintetizzati in forma grafica,

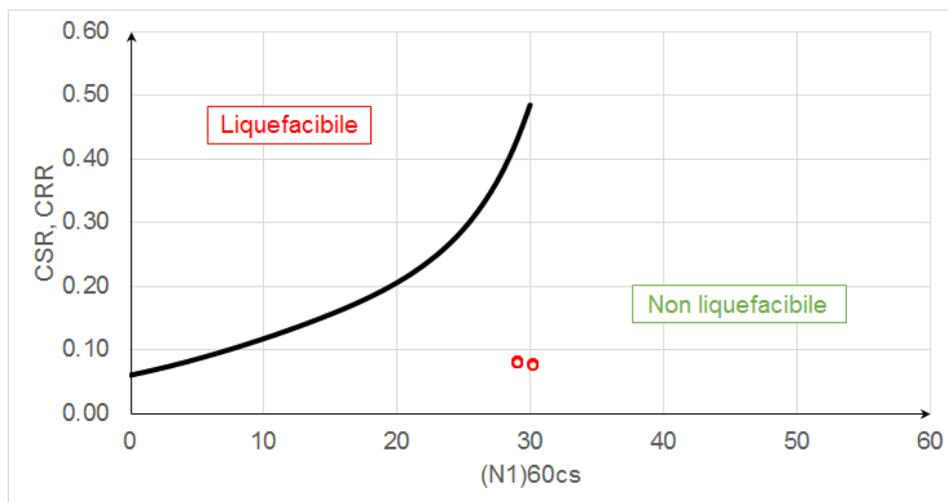


Figura 18 – Risultato verifica alla liquefazione S1.

## SONDAGGIO S2

Di seguito si riportano le curve granulometriche confrontate con le curve limite date da norma, i valori di  $N_{1,60}$  derivanti dalle prove in sito e del contenuto in fine derivanti dalle prove di laboratorio.

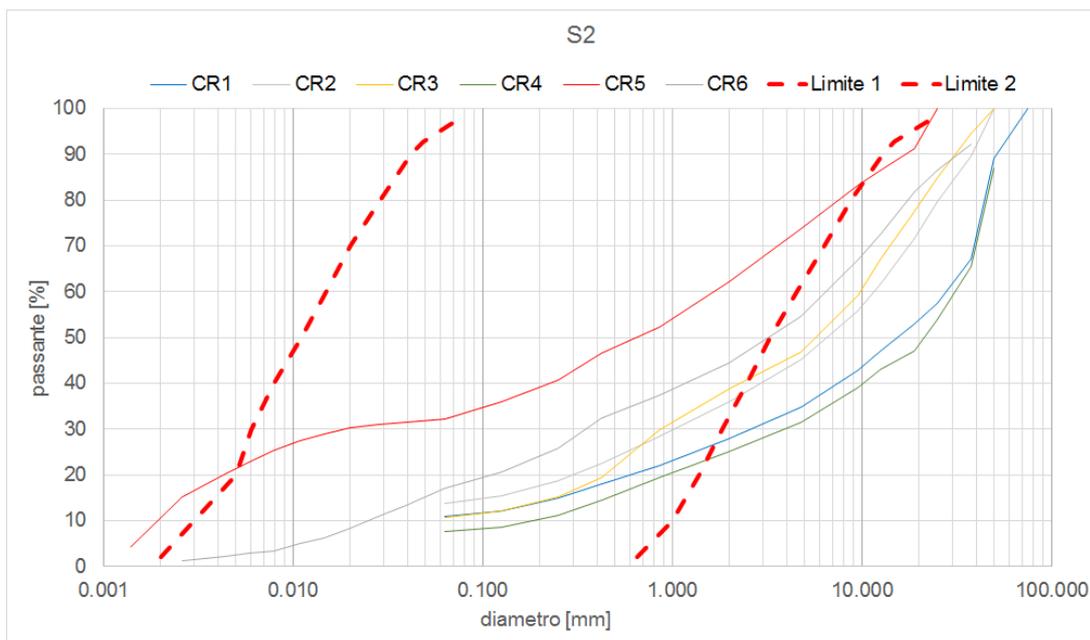


Figura 19 - Fusi granulometrici da campioni di S2.

$Z_{camp}$	$\sigma'_v$	$N_{1,60}$
[m]	[kPa]	[-]
6	114	26
9	171	32
12	228	19
15	259	45
18	286	78
21	313	41

Tabella 31 – Valori  $N_{1,60}$  ricavati da SPT eseguite in S2.

$z$	$z_i$	FC
[m]	[m]	[-]
3.0-3.5	3.2	10.80
4.5-5.0	4.7	13.80
6.0-6.5	6.2	10.70
9.0-9.5	9.2	7.50
15.0-15.5	15.2	32.20
18.0-18.5	18.2	17.10

**Tabella 32 – Contenuto fine presente in campioni S2.**

Di seguito si riporta il tabulato della verifica di suscettibilità alla liquefazione

Idriss & Boulanger											azione resistenza			
Verifica	profondità	$\sigma'_{v0}$	$r_d$	$\tau_{eq}$	$CSR_{M,\sigma_v}$	FC	$(N_1)_{60cs}$	MSF	$C_\sigma$	$K_\sigma$	$CSR_{M=4.84,\sigma'_v=1}$	$CRR_{M=4.84,\sigma'_v=1}$	FS	$L_5$
[-]	[m]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
no	0.20	3.80	1.01	0.85	0.224	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.71	0.0
no	0.40	7.60	1.00	1.69	0.223	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.72	0.0
no	0.60	11.40	1.00	2.53	0.222	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.74	0.0
no	0.80	15.20	0.99	3.36	0.221	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.76	0.0
no	1.00	19.00	0.99	4.18	0.220	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.77	0.0
no	1.20	22.80	0.99	5.00	0.219	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.79	0.0
no	1.40	26.60	0.98	5.80	0.218	10.80	71.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.80	0.0
no	1.60	30.40	0.98	6.60	0.217	10.80	43.83	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.82	0.0
no	1.80	34.20	0.97	7.39	0.216	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.10	0.4	3.84	0.0
no	2.00	38.00	0.97	8.17	0.215	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.09	0.4	3.86	0.0
no	2.20	41.80	0.96	8.94	0.214	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.09	0.4	3.88	0.0
no	2.40	45.60	0.96	9.71	0.213	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.09	0.4	3.90	0.0
no	2.60	49.40	0.95	10.46	0.212	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.09	0.4	3.92	0.0
no	2.80	53.20	0.95	11.21	0.211	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.09	0.4	3.94	0.0
no	3.00	57.00	0.94	11.94	0.210	10.80	45.42	2.07	0.18	1.10	0.09	0.4	3.96	0.0
no	3.20	60.80	0.94	12.67	0.208	13.80	7.42	2.16	0.19	1.10	0.09	0.4	4.78	0.0
no	3.40	64.60	0.93	13.38	0.207	13.80	7.42	2.16	0.19	1.08	0.09	0.4	4.75	0.0
no	3.60	68.40	0.93	14.09	0.206	13.80	7.42	2.16	0.19	1.07	0.09	0.4	4.73	0.0
no	3.80	72.20	0.92	14.78	0.205	13.80	7.42	2.16	0.19	1.06	0.09	0.4	4.72	0.0
no	4.00	76.00	0.92	15.47	0.203	13.80	7.42	2.16	0.19	1.05	0.09	0.4	4.70	0.0
no	4.20	79.80	0.91	16.14	0.202	13.80	7.42	2.16	0.19	1.04	0.09	0.4	4.69	0.0
no	4.40	83.60	0.90	16.80	0.201	13.80	7.42	2.16	0.19	1.03	0.09	0.4	4.68	0.0
no	4.60	87.40	0.90	17.45	0.200	13.80	20.42	2.16	0.19	1.03	0.09	0.4	4.67	0.0
no	4.80	91.20	0.89	18.10	0.198	10.70	20.42	2.06	0.18	1.02	0.09	0.4	3.84	0.0
no	5.00	95.00	0.89	18.73	0.197	10.70	20.42	2.06	0.18	1.01	0.09	0.4	3.84	0.0
no	5.20	98.80	0.88	19.35	0.196	10.70	20.42	2.06	0.18	1.00	0.09	0.4	3.84	0.0
no	5.40	102.60	0.87	19.95	0.194	10.70	20.42	2.06	0.18	1.00	0.09	0.4	3.84	0.0
no	5.60	106.40	0.87	20.55	0.193	10.70	20.42	2.06	0.18	0.99	0.09	0.4	3.84	0.0
no	5.80	110.20	0.86	21.14	0.192	10.70	22.26	2.06	0.18	0.98	0.09	0.4	3.84	0.0
no	6.00	114.00	0.86	21.71	0.190	10.70	22.26	2.50	0.24	0.97	0.08	0.8	10.49	0.0
no	6.20	117.80	0.85	22.28	0.189	7.50	58.26	2.42	0.23	0.96	0.08	0.7	8.25	0.0
no	6.40	121.60	0.84	22.83	0.188	7.50	58.26	2.42	0.23	0.96	0.08	0.7	8.25	0.0
no	6.60	125.40	0.84	23.37	0.186	7.50	58.26	2.42	0.23	0.95	0.08	0.7	8.25	0.0
no	6.80	129.20	0.83	23.90	0.185	7.50	58.26	2.42	0.23	0.94	0.08	0.7	8.25	0.0
no	7.00	133.00	0.83	24.42	0.184	7.50	58.26	2.42	0.23	0.94	0.08	0.7	8.25	0.0
no	7.20	136.80	0.82	24.93	0.182	7.50	58.26	2.42	0.23	0.93	0.08	0.7	8.26	0.0
no	7.40	140.60	0.81	25.42	0.181	7.50	58.26	2.42	0.23	0.92	0.08	0.7	8.27	0.0
no	7.60	144.40	0.81	25.91	0.179	7.50	58.26	2.42	0.23	0.92	0.08	0.7	8.28	0.0
no	7.80	148.20	0.80	26.38	0.178	7.50	58.26	2.42	0.23	0.91	0.08	0.7	8.29	0.0
no	8.00	152.00	0.79	26.85	0.177	7.50	58.26	2.42	0.23	0.91	0.08	0.7	8.30	0.0
no	8.20	155.80	0.79	27.30	0.175	7.50	58.26	2.42	0.23	0.90	0.08	0.7	8.32	0.0
no	8.40	159.60	0.78	27.74	0.174	7.50	58.26	2.42	0.23	0.89	0.08	0.7	8.33	0.0
no	8.60	163.40	0.78	28.17	0.172	7.50	58.26	2.42	0.23	0.89	0.08	0.7	8.35	0.0
no	8.80	167.20	0.77	28.59	0.171	7.50	58.26	2.42	0.23	0.88	0.08	0.7	8.37	0.0
no	9.00	171.00	0.76	29.00	0.170	7.50	58.26	1.58	0.13	0.93	0.12	0.2	1.71	0.0

no	9.20	174.80	0.76	29.40	0.168	32.20	29.26	1.87	0.16	0.91	0.10	0.3	2.80	0.0
no	9.40	178.60	0.75	29.79	0.167	32.20	29.26	1.87	0.16	0.91	0.10	0.3	2.82	0.0
no	9.60	182.40	0.74	30.17	0.165	32.20	29.26	1.87	0.16	0.90	0.10	0.3	2.83	0.0
no	9.80	186.20	0.74	30.54	0.164	32.20	29.26	1.87	0.16	0.90	0.10	0.3	2.84	0.0
no	10.00	190.00	0.73	30.90	0.163	32.20	29.26	1.87	0.16	0.90	0.10	0.3	2.86	0.0
no	10.20	193.80	0.73	31.25	0.161	32.20	29.26	1.87	0.16	0.89	0.10	0.3	2.87	0.0
no	10.40	197.60	0.72	31.59	0.160	32.20	29.26	1.87	0.16	0.89	0.10	0.3	2.89	0.0
no	10.60	201.40	0.71	31.92	0.158	32.20	29.26	1.87	0.16	0.89	0.10	0.3	2.90	0.0
no	10.80	205.20	0.71	32.24	0.157	32.20	29.26	1.87	0.16	0.89	0.10	0.3	2.92	0.0
si	11.00	209.00	0.70	32.55	0.156	32.20	29.26	1.87	0.16	0.88	0.09	0.3	2.93	0.0
si	11.20	210.80	0.69	32.85	0.156	32.20	29.26	1.87	0.16	0.88	0.09	0.3	2.93	0.0
si	11.40	212.60	0.69	33.14	0.156	32.20	29.26	1.87	0.16	0.88	0.09	0.3	2.92	0.0
si	11.60	214.40	0.68	33.42	0.156	32.20	29.26	1.87	0.16	0.88	0.10	0.3	2.92	0.0
si	11.80	216.20	0.68	33.70	0.156	32.20	29.54	1.87	0.16	0.88	0.10	0.3	2.91	0.0
si	12.00	218.00	0.67	33.96	0.156	32.20	29.54	1.87	0.16	0.88	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	12.20	219.80	0.66	34.22	0.156	32.20	29.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	12.40	221.60	0.66	34.47	0.156	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	12.60	223.40	0.65	34.71	0.155	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.90	0.0
si	12.80	225.20	0.65	34.95	0.155	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.90	0.0
si	13.00	227.00	0.64	35.18	0.155	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.90	0.0
si	13.20	228.80	0.63	35.39	0.155	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	13.40	230.60	0.63	35.61	0.154	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	13.60	232.40	0.62	35.81	0.154	32.20	55.54	1.87	0.16	0.87	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	13.80	234.20	0.62	36.01	0.154	32.20	55.54	1.87	0.16	0.86	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	14.00	236.00	0.61	36.20	0.153	32.20	55.54	1.87	0.16	0.86	0.10	2.77E-01	2.91	0.0
si	14.20	237.80	0.61	36.38	0.153	32.20	55.54	1.87	0.16	0.86	0.10	2.77E-01	2.92	0.0
si	14.40	239.60	0.60	36.56	0.153	32.20	55.54	1.87	0.16	0.86	0.09	2.77E-01	2.92	0.0
si	14.60	241.40	0.60	36.73	0.152	32.20	55.54	1.87	0.16	0.86	0.09	2.77E-01	2.92	0.0
si	14.80	243.20	0.59	36.90	0.152	32.20	55.54	1.87	0.16	0.86	0.09	2.77E-01	2.93	0.0
si	15.00	245.00	0.58	37.06	0.151	32.20	55.54	2.50	0.30	0.73	0.08	832.8	10071.5	0.0
si	15.20	246.80	0.58	37.21	0.151	17.10	55.54	2.50	0.30	0.73	0.08	282.8	3420.39	0.0
si	15.40	248.60	0.57	37.36	0.150	17.10	66.54	2.50	0.30	0.73	0.08	282.8	3421.34	0.0
si	15.60	250.40	0.57	37.51	0.150	17.10	66.54	2.50	0.30	0.72	0.08	282.8	3422.69	0.0
si	15.80	252.20	0.56	37.64	0.149	17.10	66.54	2.50	0.30	0.72	0.08	282.8	3424.41	0.0
si	16.00	254.00	0.56	37.78	0.149	17.10	66.54	2.50	0.30	0.72	0.08	282.8	3426.49	0.0
no	16.20	255.80	0.55	37.91	0.148	17.10	66.54	2.50	0.30	0.72	0.08	282.8	3428.91	0.0
no	16.40	257.60	0.55	38.03	0.148	17.10	66.54	2.50	0.30	0.72	0.08	282.8	3431.64	0.0
no	16.60	259.40	0.54	38.15	0.147	17.10	66.54	2.50	0.30	0.71	0.08	282.8	3434.68	0.0
no	16.80	261.20	0.54	38.27	0.147	17.10	66.54	2.50	0.30	0.71	0.08	282.8	3438.00	0.0
no	17.00	263.00	0.53	38.38	0.146	17.10	66.54	2.50	0.30	0.71	0.08	282.8	3441.58	0.0
no	17.20	264.80	0.53	38.49	0.145	17.10	66.54	2.50	0.30	0.71	0.08	282.8	3445.41	0.0
no	17.40	266.60	0.53	38.59	0.145	17.10	66.54	2.50	0.30	0.71	0.08	282.8	3449.47	0.0
no	17.60	268.40	0.52	38.69	0.144	17.10	66.54	2.50	0.30	0.70	0.08	282.8	3453.74	0.0
no	17.80	270.20	0.52	38.79	0.144	17.10	66.54	2.50	0.30	0.70	0.08	282.8	3458.22	0.0
no	18.00	272.00	0.51	38.89	0.143	17.10	66.54	2.50	-0.24	1.10	0.05	1.8E+30	3.4E+31	0.0
no	18.20	273.80	0.51	38.98	0.142	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.8E+25	0.0
no	18.40	275.60	0.50	39.07	0.142	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.8E+25	0.0
no	18.60	277.40	0.50	39.16	0.141	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.8E+25	0.0
no	18.80	279.20	0.49	39.24	0.141	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.9E+25	0.0
no	19.00	281.00	0.49	39.32	0.140	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.9E+25	0.0
no	19.20	282.80	0.49	39.41	0.139	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.9E+25	0.0
no	19.40	284.60	0.48	39.48	0.139	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.9E+25	0.0

no	19.60	286.40	0.48	39.56	0.138	0.00	66.54	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.9E+25	0.0
no	19.80	288.20	0.47	39.64	0.138	0.00	62.00	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	3.9E+25	0.0
no	20.00	290.00	0.47	39.71	0.137	0.00	62.00	2.50	-0.28	1.10	0.05	2.0E+24	4.0E+25	0.0

I risultati riportati in tabella sono di seguito sintetizzati in forma grafica,

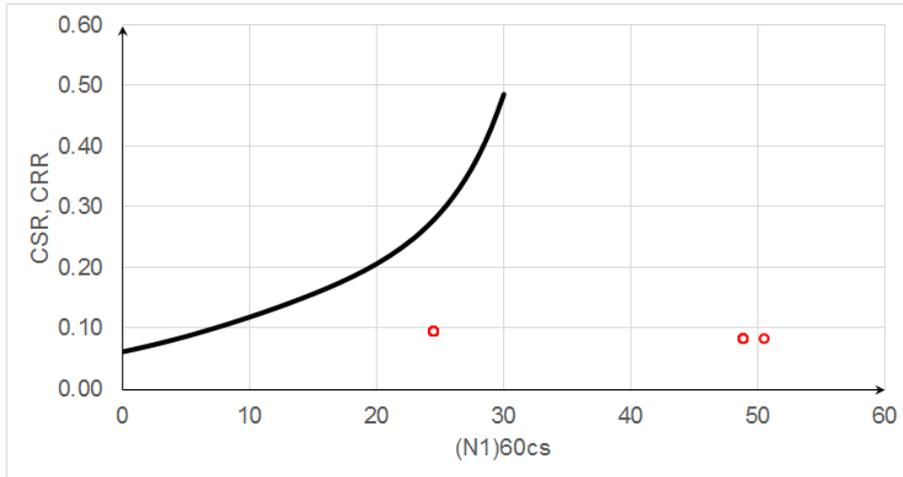


Figura 20 – Risultato verifica alla liquefazione S2.

## SONDAGGIO S1\_PD-BS

Di seguito si riportano le curve granulometriche confrontate con le curve limite date da norma, i valori di  $N_{1,60}$  derivanti dalle prove in sito e del contenuto in fine derivanti dalle prove di laboratorio,

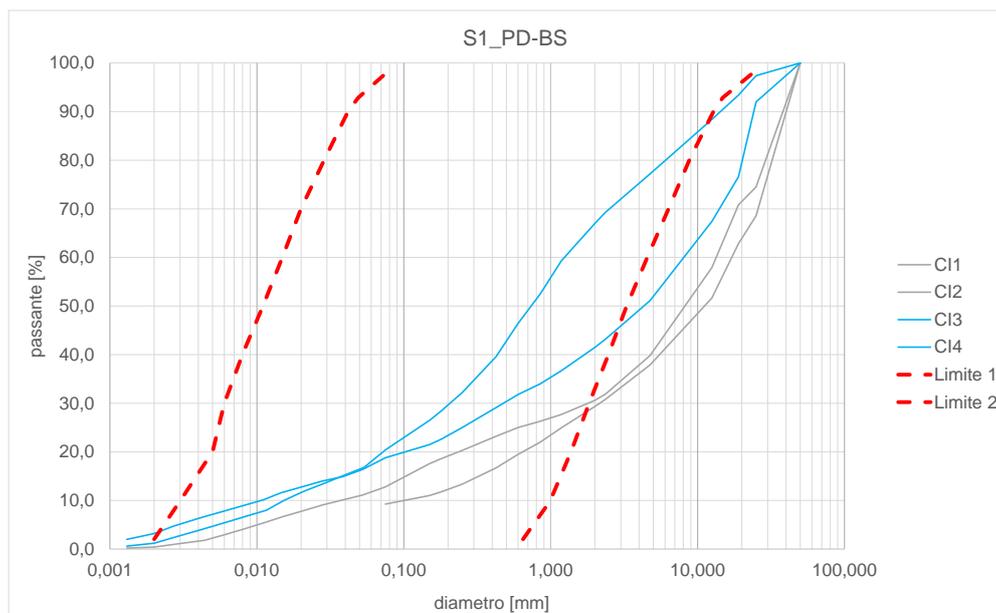


Figura 21 - Fusi granulometrici da campioni di S1\_PD-BS,

$Z_{camp}$ [m]	$\sigma'_v$ [kPa]	$N_{1,60}$ [-]
1,5	28,5	71
3	57	43
4,5	85,5	5
6	114	18
9	171	54
12	228	25
15	259	51
18	286	62
21	313	57
24	340	32

Tabella 33 – Valori  $N_{1,60}$  ricavati da SPT eseguite in S1\_PD-BS

$z$ [m]	$z_i$ [m]	FC [-]
1,70 – 2,0	1,7	9,26
5,70 - 6,0	5,7	12,80
11,70 - 12,0	11,7	18,80
19,7 -20,0	19,7	20,40

Tabella 34 – Contenuto fine presente in campioni S1\_PD-BS

Di seguito si riporta il tabulato della verifica di suscettibilità alla liquefazione

Verifica	profondità	$\sigma'_{v0}$	Idriss & Boulanger		CSR <sub>M,σ'v</sub>	FC	(N <sub>1</sub> ) <sub>60cs</sub>	MSF	C <sub>σ</sub>	K <sub>σ</sub>	azione resistenza				
			r <sub>d</sub>	τ <sub>eq</sub>							CSR <sub>M=4,84,σ'v=1</sub>	CRR <sub>M=4,84,σ'v=1</sub>	FS	L <sub>s</sub>	
[-]	[m]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
no	0,20	3,80	1,01	0,85	0,224	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,15E+17	0,00	
no	0,40	7,60	1,00	1,69	0,223	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,17E+17	0,00	
no	0,60	11,40	1,00	2,53	0,222	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,20E+17	0,00	
no	0,80	15,20	0,99	3,36	0,221	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,22E+17	0,00	
no	1,00	19,00	0,99	4,18	0,220	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,24E+17	0,00	
no	1,20	22,80	0,99	5,00	0,219	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,26E+17	0,00	
no	1,40	26,60	0,98	5,80	0,218	9,26	71,83	2,50	0,00	1,00	0,09	4,61E+16	5,29E+17	0,00	
no	1,60	30,40	0,98	6,60	0,217	9,26	57,83	2,50	0,30	1,10	0,08	1,80E+01	2,28E+02	0,00	
no	1,80	34,20	0,97	7,39	0,216	12,80	34,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	4,89E+02	0,00	
no	2,00	38,00	0,97	8,17	0,215	12,80	2,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	491,85	0,00	
no	2,20	41,80	0,96	8,94	0,214	12,80	2,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	494,31	0,00	
no	2,40	45,60	0,96	9,71	0,213	12,80	2,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	496,84	0,00	
no	2,60	49,40	0,95	10,46	0,212	12,80	2,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	499,45	0,00	
no	2,80	53,20	0,95	11,21	0,211	12,80	2,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	502,13	0,00	
no	3,00	57,00	0,94	11,94	0,210	12,80	2,42	2,50	0,30	1,10	0,08	38,44	504,88	0,00	
no	3,20	60,80	0,94	12,67	0,208	12,80	7,42	1,18	0,08	1,04	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	3,40	64,60	0,93	13,38	0,207	12,80	7,42	1,18	0,08	1,04	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	3,60	68,40	0,93	14,09	0,206	12,80	7,42	1,18	0,08	1,03	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	3,80	72,20	0,92	14,78	0,205	12,80	7,42	1,18	0,08	1,03	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	4,00	76,00	0,92	15,47	0,203	12,80	7,42	1,18	0,08	1,02	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	4,20	79,80	0,91	16,14	0,202	12,80	7,42	1,18	0,08	1,02	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	4,40	83,60	0,90	16,80	0,201	12,80	7,42	1,18	0,08	1,01	0,17	0,10	0,60	0,00	
no	4,60	87,40	0,90	17,45	0,200	12,80	20,42	1,64	0,14	1,02	0,12	0,21	1,76	0,00	
no	4,80	91,20	0,89	18,10	0,198	12,80	20,42	1,64	0,14	1,01	0,12	0,21	1,77	0,00	
no	5,00	95,00	0,89	18,73	0,197	12,80	20,42	1,64	0,14	1,01	0,12	0,21	1,77	0,00	
no	5,20	98,80	0,88	19,35	0,196	12,80	20,42	1,64	0,14	1,00	0,12	0,21	1,77	0,00	
no	5,40	102,60	0,87	19,95	0,194	12,80	20,42	1,64	0,14	1,00	0,12	0,21	1,77	0,00	
no	5,60	106,40	0,87	20,55	0,193	12,80	20,42	1,64	0,14	0,99	0,12	0,21	1,78	0,00	
no	5,80	110,20	0,86	21,14	0,192	18,80	22,26	1,74	0,15	0,99	0,11	0,24	2,12	0,00	
no	6,00	114,00	0,86	21,71	0,190	18,80	22,26	1,74	0,15	0,98	0,11	0,24	2,12	0,00	
no	6,20	117,80	0,85	22,28	0,189	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,08	1,44E+06	1,90E+07	0,00	
no	6,40	121,60	0,84	22,83	0,188	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,08	1,44E+06	1,92E+07	0,00	
no	6,60	125,40	0,84	23,37	0,186	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	1,93E+07	0,00	

no	6,80	129,20	0,83	23,90	0,185	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	1,94E+07	0,00
no	7,00	133,00	0,83	24,42	0,184	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	1,96E+07	0,00
no	7,20	136,80	0,82	24,93	0,182	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	1,97E+07	0,00
no	7,40	140,60	0,81	25,42	0,181	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	1,99E+07	0,00
no	7,60	144,40	0,81	25,91	0,179	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,00E+07	0,00
no	7,80	148,20	0,80	26,38	0,178	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,02E+07	0,00
no	8,00	152,00	0,79	26,85	0,177	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,04E+07	0,00
no	8,20	155,80	0,79	27,30	0,175	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,05E+07	0,00
no	8,40	159,60	0,78	27,74	0,174	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,07E+07	0,00
no	8,60	163,40	0,78	28,17	0,172	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,09E+07	0,00
no	8,80	167,20	0,77	28,59	0,171	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,10E+07	0,00
no	9,00	171,00	0,76	29,00	0,170	18,80	58,26	2,50	0,00	1,00	0,07	1,44E+06	2,12E+07	0,00
no	9,20	174,80	0,76	29,40	0,168	18,80	4,26	2,19	0,20	0,89	0,09	0,44	5,13	0,00
no	9,40	178,60	0,75	29,79	0,167	18,80	4,26	2,19	0,20	0,89	0,09	0,44	5,15	0,00
no	9,60	182,40	0,74	30,17	0,165	18,80	4,26	2,19	0,20	0,88	0,09	0,44	5,17	0,00
no	9,80	186,20	0,74	30,54	0,164	18,80	4,26	2,19	0,20	0,88	0,09	0,44	5,19	0,00
no	10,00	190,00	0,73	30,90	0,163	18,80	4,26	2,19	0,20	0,87	0,08	0,44	5,21	0,00
no	10,20	193,80	0,73	31,25	0,161	18,80	4,26	2,19	0,20	0,87	0,08	0,44	5,23	0,00
no	10,40	197,60	0,72	31,59	0,160	18,80	4,26	2,19	0,20	0,87	0,08	0,44	5,26	0,00
no	10,60	201,40	0,71	31,92	0,158	18,80	4,26	2,19	0,20	0,86	0,08	0,44	5,28	0,00
no	10,80	205,20	0,71	32,24	0,157	18,80	4,26	2,19	0,20	0,86	0,08	0,44	5,30	0,00
si	11,00	209,00	0,70	32,55	0,156	18,80	4,26	2,19	0,20	0,86	0,08	0,44	5,33	0,00
si	11,20	210,80	0,69	32,85	0,156	18,80	4,26	2,19	0,20	0,85	0,08	0,44	5,31	0,00
si	11,40	212,60	0,69	33,14	0,156	18,80	4,26	2,19	0,20	0,85	0,08	0,44	5,30	0,00
si	11,60	214,40	0,68	33,42	0,156	18,80	4,26	2,19	0,20	0,85	0,08	0,44	5,29	0,00
si	11,80	216,20	0,68	33,70	0,156	20,40	4,54	2,21	0,20	0,85	0,08	0,46	5,51	0,00
si	12,00	218,00	0,67	33,96	0,156	20,40	4,54	2,21	0,20	0,85	0,08	0,46	5,50	0,00
si	12,20	219,80	0,66	34,22	0,156	20,40	4,54	2,21	0,20	0,84	0,08	0,46	5,49	0,00
si	12,40	221,60	0,66	34,47	0,156	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,13E+06	0,00
si	12,60	223,40	0,65	34,71	0,155	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,13E+06	0,00
si	12,80	225,20	0,65	34,95	0,155	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,14E+06	0,00
si	13,00	227,00	0,64	35,18	0,155	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,14E+06	0,00
si	13,20	228,80	0,63	35,39	0,155	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,14E+06	0,00
si	13,40	230,60	0,63	35,61	0,154	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,14E+06	0,00
si	13,60	232,40	0,62	35,81	0,154	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,14E+06	0,00
si	13,80	234,20	0,62	36,01	0,154	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,15E+06	0,00
si	14,00	236,00	0,61	36,20	0,153	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,15E+06	0,00
si	14,20	237,80	0,61	36,38	0,153	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,15E+06	0,00
si	14,40	239,60	0,60	36,56	0,153	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,16E+06	0,00
si	14,60	241,40	0,60	36,73	0,152	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,16E+06	0,00
si	14,80	243,20	0,59	36,90	0,152	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,16E+06	0,00

si	15,00	245,00	0,58	37,06	0,151	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,17E+06	0,00
si	15,20	246,80	0,58	37,21	0,151	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	7,05E+04	1,17E+06	0,00
si	15,40	248,60	0,57	37,36	0,150	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	7,91E+12	0,00
si	15,60	250,40	0,57	37,51	0,150	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	7,94E+12	0,00
si	15,80	252,20	0,56	37,64	0,149	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	7,96E+12	0,00
si	16,00	254,00	0,56	37,78	0,149	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	7,99E+12	0,00
si	16,20	255,80	0,55	37,91	0,148	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,02E+12	0,00
si	16,40	257,60	0,55	38,03	0,148	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,05E+12	0,00
si	16,60	259,40	0,54	38,15	0,147	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,08E+12	0,00
si	16,80	261,20	0,54	38,27	0,147	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,11E+12	0,00
si	17,00	263,00	0,53	38,38	0,146	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,15E+12	0,00
si	17,20	264,80	0,53	38,49	0,145	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,18E+12	0,00
si	17,40	266,60	0,53	38,59	0,145	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,21E+12	0,00
si	17,60	268,40	0,52	38,69	0,144	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,25E+12	0,00
si	17,80	270,20	0,52	38,79	0,144	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,28E+12	0,00
si	18,00	272,00	0,51	38,89	0,143	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,32E+12	0,00
si	18,20	273,80	0,51	38,98	0,142	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,35E+12	0,00
si	18,40	275,60	0,50	39,07	0,142	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,39E+12	0,00
si	18,60	277,40	0,50	39,16	0,141	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,42E+12	0,00
si	18,80	279,20	0,49	39,24	0,141	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,46E+12	0,00
si	19,00	281,00	0,49	39,32	0,140	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,50E+12	0,00
si	19,20	282,80	0,49	39,41	0,139	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,53E+12	0,00
si	19,40	284,60	0,48	39,48	0,139	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,57E+12	0,00
si	19,60	286,40	0,48	39,56	0,138	20,40	4,54	2,50	0,00	1,00	0,06	4,75E+11	8,61E+12	0,00
si	19,80	288,20	0,47	39,64	0,138	0,00	0,00	2,50	0,00	1,00	0,05	2,20E+08	4,00E+09	0,00
si	20,00	290,00	0,47	39,71	0,137	0,00	0,00	2,50	0,00	1,00	0,05	2,20E+08	4,01E+09	0,00

I risultati riportati in tabella sono di seguito sintetizzati in forma grafica,

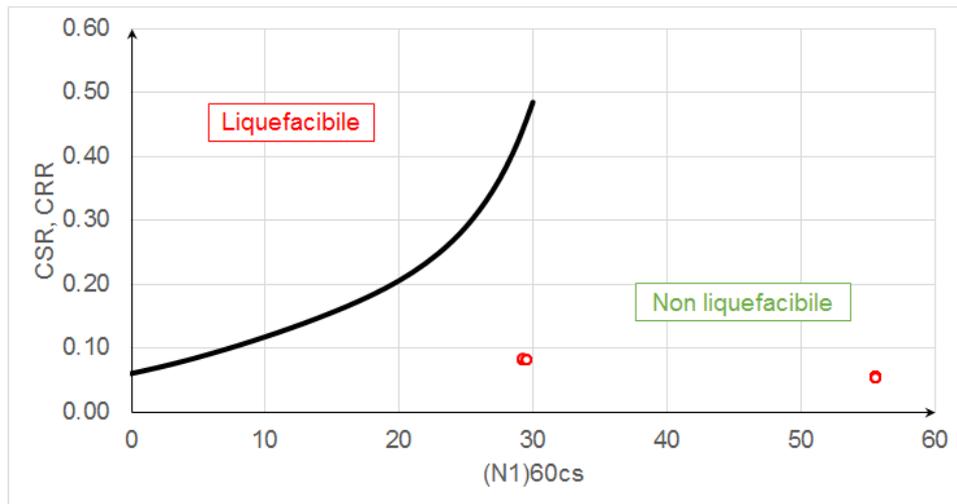


Figura 22 – Risultato verifica alla liquefazione S1\_PD-BS

## SONDAGGIO S2\_PD-BS

Di seguito si riportano le curve granulometriche confrontate con le curve limite date da norma, i valori di  $N_{1,60}$  derivanti dalle prove in sito e del contenuto in fine derivanti dalle prove di laboratorio.

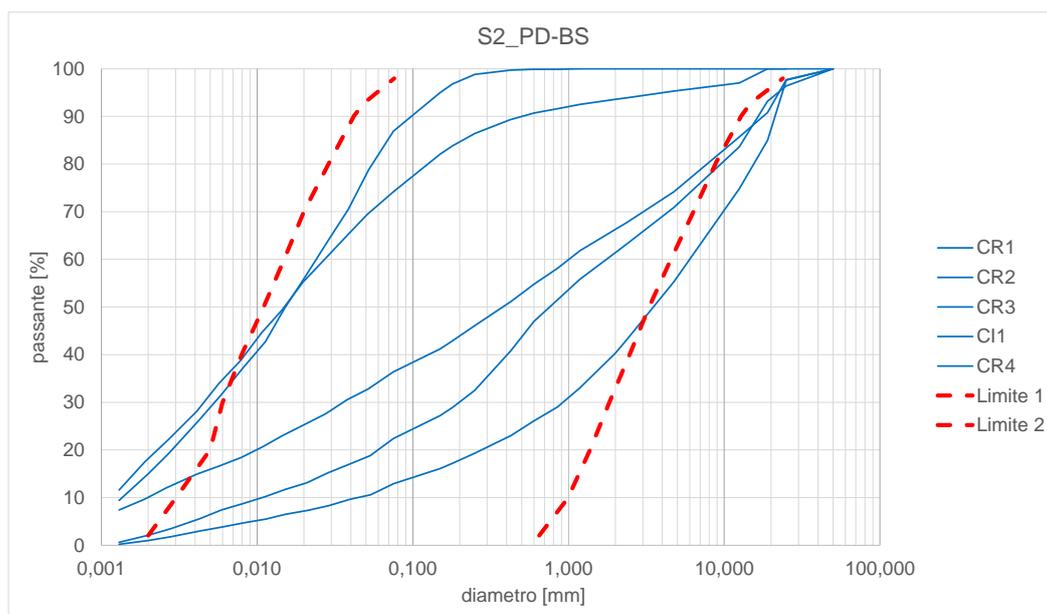


Figura 23 - Fusi granulometrici da campioni di S2\_PD-BS

Z <sub>camp</sub> [m]	$\sigma'_v$ [kPa]	$N_{1,60}$ [-]
1,5	28,5	8
3	57	38
4,5	85,5	24
6	114	46
7,5	142,5	23
9	171	34
12	218	20
15	245	48
18	272	24
21	299	30
24	326	45

Tabella 35 – Valori  $N_{1,60}$  ricavati da SPT eseguite in S2\_PD-BS

z	z <sub>i</sub>	FC
[m]	[m]	[-]
1,70 - 2,00	1,7	74,20
7,70 - 8,00	7,7	12,90
14,7 - 15,0	14,7	22,40
17,5 - 18,0	17,5	86,90
20,0 - 20,3	20	36,40

Tabella 36 – Contenuto fine presente in campioni S2\_PD-BS

Di seguito si riporta il tabulato della verifica di suscettibilità alla liquefazione

Verifica	prof	Idriss & Boulanger				FC	(N <sub>1</sub> ) <sub>60cs</sub>	MSF	C <sub>σ</sub>	K <sub>σ</sub>	azione resistenza			
		σ' <sub>v0</sub>	r <sub>d</sub>	τ <sub>eq</sub>	CSR <sub>M,σv</sub>						CSR <sub>M=7,5,σv=1</sub>	CRR <sub>M=7,5,σv=1</sub>	FS	L <sub>s</sub>
[-]	[m]	[kPa]	[-]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
no	0,20	3,80	1,01	0,85	0,224	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,96	0,0
no	0,40	7,60	1,00	1,69	0,223	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,96	0,0
no	0,60	11,40	1,00	2,53	0,222	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,96	0,0
no	0,80	15,20	0,99	3,36	0,221	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,97	0,0
no	1,00	19,00	0,99	4,18	0,220	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,97	0,0
no	1,20	22,80	0,99	5,00	0,219	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,97	0,0
no	1,40	26,60	0,98	5,80	0,218	74,20	13,56	1,34	0,11	1,10	0,15	0,1	0,98	0,0
no	1,60	30,40	0,98	6,60	0,217	74,20	43,56	2,50	0,30	1,10	0,08	16,0	202,57	0,0
no	1,80	34,20	0,97	7,39	0,216	12,90	40,47	2,50	0,30	1,10	0,08	4,8	61,44	0,0
no	2,00	38,00	0,97	8,17	0,215	12,90	40,47	2,50	0,30	1,10	0,08	4,8	61,74	0,0
no	2,20	41,80	0,96	8,94	0,214	12,90	40,47	2,50	0,30	1,10	0,08	4,8	62,05	0,0
no	2,40	45,60	0,96	9,71	0,213	12,90	40,47	2,50	0,30	1,10	0,08	4,8	62,37	0,0
no	2,60	49,40	0,95	10,46	0,212	12,90	40,47	2,50	0,30	1,10	0,08	4,8	62,70	0,0
no	2,80	53,20	0,95	11,21	0,211	12,90	40,47	2,50	0,30	1,10	0,08	4,8	63,03	0,0
no	3,00	57,00	0,94	11,94	0,210	12,90	26,47	2,00	0,17	1,10	0,10	0,3	3,44	0,0
no	3,20	60,80	0,94	12,67	0,208	12,90	26,47	2,00	0,17	1,09	0,10	0,3	3,43	0,0
no	3,40	64,60	0,93	13,38	0,207	12,90	26,47	2,00	0,17	1,08	0,10	0,3	3,41	0,0
no	3,60	68,40	0,93	14,09	0,206	12,90	26,47	2,00	0,17	1,07	0,10	0,3	3,40	0,0
no	3,80	72,20	0,92	14,78	0,205	12,90	26,47	2,00	0,17	1,06	0,10	0,3	3,39	0,0
no	4,00	76,00	0,92	15,47	0,203	12,90	26,47	2,00	0,17	1,05	0,10	0,3	3,38	0,0
no	4,20	79,80	0,91	16,14	0,202	12,90	26,47	2,00	0,17	1,04	0,10	0,3	3,38	0,0
no	4,40	83,60	0,90	16,80	0,201	12,90	26,47	2,00	0,17	1,03	0,10	0,3	3,37	0,0
no	4,60	87,40	0,90	17,45	0,200	12,90	48,47	2,50	0,30	1,04	0,08	217,0	2828,05	0,0
no	4,80	91,20	0,89	18,10	0,198	12,90	48,47	2,50	0,30	1,03	0,08	217,0	2811,48	0,0
no	5,00	95,00	0,89	18,73	0,197	12,90	48,47	2,50	0,30	1,02	0,08	217,0	2796,30	0,0
no	5,20	98,80	0,88	19,35	0,196	12,90	48,47	2,50	0,30	1,00	0,08	217,0	2782,41	0,0
no	5,40	102,60	0,87	19,95	0,194	12,90	48,47	2,50	0,30	0,99	0,08	217,0	2769,72	0,0
no	5,60	106,40	0,87	20,55	0,193	12,90	48,47	2,50	0,30	0,98	0,08	217,0	2758,16	0,0
no	5,80	110,20	0,86	21,14	0,192	12,90	48,47	2,50	0,30	0,97	0,08	217,0	2747,66	0,0
no	6,00	114,00	0,86	21,71	0,190	12,90	25,47	1,93	0,17	0,98	0,10	0,3	2,99	0,0
no	6,20	117,80	0,85	22,28	0,189	12,90	25,47	1,93	0,17	0,97	0,10	0,3	2,99	0,0

no	6,40	121,60	0,84	22,83	0,188	12,90	25,47	1,93	0,17	0,97	0,10	0,3	3,00	0,0
no	6,60	125,40	0,84	23,37	0,186	12,90	25,47	1,93	0,17	0,96	0,10	0,3	3,01	0,0
no	6,80	129,20	0,83	23,90	0,185	12,90	25,47	1,93	0,17	0,96	0,10	0,3	3,01	0,0
no	7,00	133,00	0,83	24,42	0,184	12,90	25,47	1,93	0,17	0,95	0,10	0,3	3,02	0,0
no	7,20	136,80	0,82	24,93	0,182	12,90	25,47	1,93	0,17	0,95	0,10	0,3	3,03	0,0
no	7,40	140,60	0,81	25,42	0,181	12,90	25,47	1,93	0,17	0,94	0,10	0,3	3,04	0,0
no	7,60	144,40	0,81	25,91	0,179	12,90	36,47	2,50	0,29	0,90	0,08	1,5	19,17	0,0
no	7,80	148,20	0,80	26,38	0,178	22,40	38,82	2,50	0,30	0,88	0,08	2,9	35,50	0,0
no	8,00	152,00	0,79	26,85	0,177	22,40	38,82	2,50	0,30	0,87	0,08	2,9	35,48	0,0
no	8,20	155,80	0,79	27,30	0,175	22,40	38,82	2,50	0,30	0,87	0,08	2,9	35,46	0,0
no	8,40	159,60	0,78	27,74	0,174	22,40	38,82	2,50	0,30	0,86	0,08	2,9	35,45	0,0
no	8,60	163,40	0,78	28,17	0,172	22,40	38,82	2,50	0,30	0,85	0,08	2,9	35,44	0,0
no	8,80	167,20	0,77	28,59	0,171	22,40	38,82	2,50	0,30	0,85	0,08	2,9	35,44	0,0
no	9,00	171,00	0,76	29,00	0,170	22,40	24,82	1,89	0,16	0,91	0,10	0,3	2,91	0,0
no	9,20	174,80	0,76	29,40	0,168	22,40	24,82	1,89	0,16	0,91	0,10	0,3	2,92	0,0
no	9,40	178,60	0,75	29,79	0,167	22,40	24,82	1,89	0,16	0,91	0,10	0,3	2,93	0,0
no	9,60	182,40	0,74	30,17	0,165	22,40	24,82	1,89	0,16	0,90	0,10	0,3	2,95	0,0
no	9,80	186,20	0,74	30,54	0,164	22,40	24,82	1,89	0,16	0,90	0,10	0,3	2,96	0,0
no	10,00	190,00	0,73	30,90	0,163	22,40	24,82	1,89	0,16	0,90	0,10	0,3	2,98	0,0
no	10,20	193,80	0,73	31,25	0,161	22,40	24,82	1,89	0,16	0,89	0,10	0,3	2,99	0,0
no	10,40	197,60	0,72	31,59	0,160	22,40	24,82	1,89	0,16	0,89	0,10	0,3	3,01	0,0
no	10,60	201,40	0,71	31,92	0,158	22,40	24,82	1,89	0,16	0,89	0,09	0,3	3,02	0,0
no	10,80	205,20	0,71	32,24	0,157	22,40	24,82	1,89	0,16	0,88	0,09	0,3	3,04	0,0
si	11,00	209,00	0,70	32,55	0,156	22,40	24,82	1,89	0,16	0,88	0,09	0,3	3,05	0,0
si	11,20	210,80	0,69	32,85	0,156	22,40	24,82	1,89	0,16	0,88	0,09	0,3	3,05	0,0
si	11,40	212,60	0,69	33,14	0,156	22,40	24,82	1,89	0,16	0,88	0,09	0,3	3,04	0,0
si	11,60	214,40	0,68	33,42	0,156	22,40	24,82	1,89	0,16	0,88	0,09	0,3	3,04	0,0
si	11,80	216,20	0,68	33,70	0,156	22,40	24,82	1,89	0,16	0,88	0,09	0,3	3,03	0,0
si	12,00	218,00	0,67	33,96	0,156	22,40	52,82	2,50	0,30	0,77	0,08	5,48E+03	6,74E+04	0,0
si	12,20	219,80	0,66	34,22	0,156	22,40	52,82	2,50	0,30	0,76	0,08	5,48E+03	6,72E+04	0,0
si	12,40	221,60	0,66	34,47	0,156	22,40	52,82	2,50	0,30	0,76	0,08	5,48E+03	6,70E+04	0,0
si	12,60	223,40	0,65	34,71	0,155	22,40	52,82	2,50	0,30	0,76	0,08	5,48E+03	6,69E+04	0,0
si	12,80	225,20	0,65	34,95	0,155	22,40	52,82	2,50	0,30	0,76	0,08	5,48E+03	6,68E+04	0,0
si	13,00	227,00	0,64	35,18	0,155	22,40	52,82	2,50	0,30	0,75	0,08	5,48E+03	6,67E+04	0,0
si	13,20	228,80	0,63	35,39	0,155	22,40	52,82	2,50	0,30	0,75	0,08	5,48E+03	6,66E+04	0,0
si	13,40	230,60	0,63	35,61	0,154	22,40	52,82	2,50	0,30	0,75	0,08	5,48E+03	6,65E+04	0,0
si	13,60	232,40	0,62	35,81	0,154	22,40	52,82	2,50	0,30	0,75	0,08	5,48E+03	6,64E+04	0,0
si	13,80	234,20	0,62	36,01	0,154	22,40	52,82	2,50	0,30	0,74	0,08	5,48E+03	6,64E+04	0,0
si	14,00	236,00	0,61	36,20	0,153	22,40	52,82	2,50	0,30	0,74	0,08	5,48E+03	6,63E+04	0,0
si	14,20	237,80	0,61	36,38	0,153	22,40	52,82	2,50	0,30	0,74	0,08	5,48E+03	6,63E+04	0,0
si	14,40	239,60	0,60	36,56	0,153	22,40	52,82	2,50	0,30	0,74	0,08	5,48E+03	6,62E+04	0,0
si	14,60	241,40	0,60	36,73	0,152	22,40	52,82	2,50	0,30	0,74	0,08	5,48E+03	6,62E+04	0,0
si	14,80	243,20	0,59	36,90	0,152	86,90	53,52	2,50	0,30	0,73	0,08	1,02E+04	1,23E+05	0,0
no	15,00	245,00	0,58	37,06	0,151	86,90	29,52	2,21	0,20	0,82	0,08	0,5	5,49	0,0
no	15,20	246,80	0,58	37,21	0,151	86,90	29,52	2,21	0,20	0,82	0,08	0,5	5,50	0,0
no	15,40	248,60	0,57	37,36	0,150	86,90	29,52	2,21	0,20	0,82	0,08	0,5	5,51	0,0
no	15,60	250,40	0,57	37,51	0,150	86,90	29,52	2,21	0,20	0,82	0,08	0,5	5,52	0,0
no	15,80	252,20	0,56	37,64	0,149	86,90	29,52	2,21	0,20	0,82	0,08	0,5	5,53	0,0
no	16,00	254,00	0,56	37,78	0,149	86,90	29,52	2,21	0,20	0,82	0,08	0,5	5,54	0,0
no	16,20	255,80	0,55	37,91	0,148	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,55	0,0
no	16,40	257,60	0,55	38,03	0,148	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,56	0,0
no	16,60	259,40	0,54	38,15	0,147	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,57	0,0

no	16,80	261,20	0,54	38,27	0,147	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,58	0,0
no	17,00	263,00	0,53	38,38	0,146	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,60	0,0
no	17,20	264,80	0,53	38,49	0,145	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,61	0,0
no	17,40	266,60	0,53	38,59	0,145	86,90	29,52	2,21	0,20	0,81	0,08	0,5	5,62	0,0
no	17,60	268,40	0,52	38,69	0,144	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,64	0,0
no	17,80	270,20	0,52	38,79	0,144	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,66	0,0
si	18,00	272,00	0,51	38,89	0,143	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,67	0,0
si	18,20	273,80	0,51	38,98	0,142	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,69	0,0
si	18,40	275,60	0,50	39,07	0,142	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,70	0,0
si	18,60	277,40	0,50	39,16	0,141	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,72	0,0
si	18,80	279,20	0,49	39,24	0,141	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,73	0,0
si	19,00	281,00	0,49	39,32	0,140	36,40	29,53	2,21	0,20	0,80	0,08	0,5	5,75	0,0
si	19,20	282,80	0,49	39,41	0,139	36,40	29,53	2,21	0,20	0,79	0,08	0,5	5,76	0,0
si	19,40	284,60	0,48	39,48	0,139	36,40	29,53	2,21	0,20	0,79	0,08	0,5	5,78	0,0
si	19,60	286,40	0,48	39,56	0,138	36,40	29,53	2,21	0,20	0,79	0,08	0,5	5,79	0,0
si	19,80	288,20	0,47	39,64	0,138	36,40	29,53	2,21	0,20	0,79	0,08	0,5	5,81	0,0
si	20,00	290,00	0,47	39,71	0,137	0,00	24,00	1,84	0,16	0,83	0,09	0,3	3,00	0,0

I risultati riportati in tabella sono di seguito sintetizzati in forma grafica,

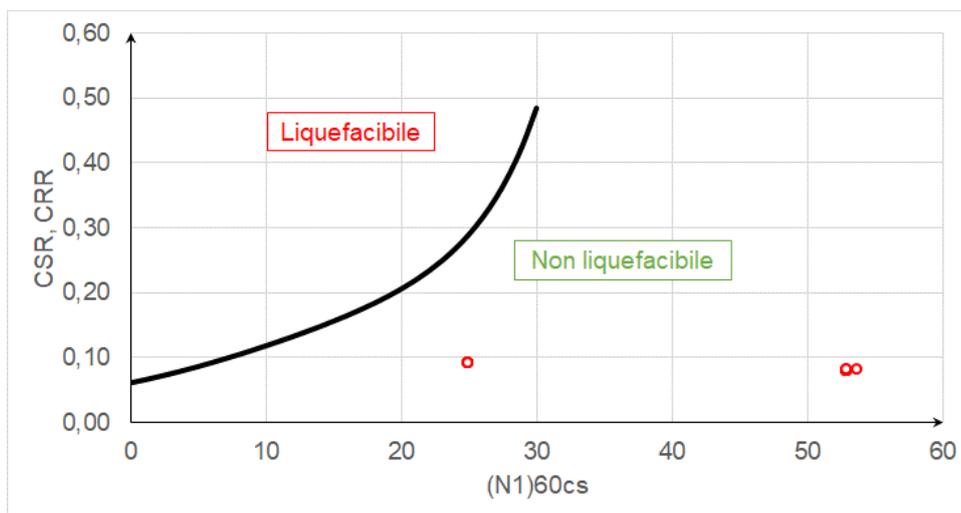


Figura 24 – Risultato verifica alla liquefazione S2\_PD-BS