

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



CUP: F81H91000000008

U.O. INFRASTRUTTURE NORD

PROGETTAZIONE PRELIMINARE

INFRASTRUTTURE FERROVIARIE STRATEGICHE DEFINITE DALLA LEGGE OBIETTIVO N. 443/01

**LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA
Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA**

Relazione geotecnica dell'intervento

SCALA:

-

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

I N O W 0 0 R 2 6 R G C S 0 0 0 0 0 0 3 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione Esecutiva	P.Luciani	Maggio 2019	C.Laporta	Maggio 2019	A. Campanella	Maggio 2019	Francesco Sacchi Maggio 2019

ITALFERR - UO INFRASTRUTTURE NORD
C/O: Francesco Sacchi
Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma
n. 23192/2019

INDICE

1.	PREMESSA.....	3
2.	NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	5
2.1.	NORMATIVE DI RIFERIMENTO.....	5
3.	INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE.....	6
3.1.	UBICAZIONE DEI SONDAGGI.....	7
3.2.	SONDAGGI GEOGNOSTICI E VALORI DI SPT.....	10
3.3.	INDAGINI SISMICHE.....	12
3.4.	PROVE DI PERMEABILITA'.....	12
4.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	13
4.1.	DEFINIZIONE DELLE UNITA' GEOTECNICHE INTERCETTATE.....	13
1.1.1	<i>Depositi incoerenti.....</i>	<i>14</i>
1.1.2	<i>Depositi coesivi.....</i>	<i>21</i>
4.2.	UNITA' GEOTECNICA R.....	27
4.3.	UNITA' GEOTECNICA G/S.....	28
4.4.	UNITA' GEOTECNICA S/L.....	28
5.	FALDA.....	29
6.	CLASSIFICAZIONE SISMICA E STABILITA' DEL SITO.....	30
6.1.	DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI PROGETTO.....	30
6.2.	ANALISI DI PERICOLOSITA' RISPETTO AL FENOMENO DELLA LIQUEFAZIONE.....	37
1.1.3	<i>Metodo di Analisi.....</i>	<i>40</i>
1.1.4	<i>CRR da correlazione su prove SPT.....</i>	<i>41</i>
6.3.	RISULTATI E CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	45



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA

Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOW	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	3 di 45

1. **PREMESSA**

Il presente documento costituisce la Relazione Geotecnica redatta nell'ambito del Progetto preliminare del Quadruplicamento est in uscita da Brescia della linea A.V. /A.C. Torino – Venezia, tratta Milano-Verona.

Nell'area di interesse sono state effettuate le seguenti indagini geotecniche:



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA
Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOW	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	4 di 45

Lo studio raccoglie e sintetizza le informazioni attualmente disponibili derivanti sia da fonti bibliografiche sia da indagini geognostiche realizzate da Italferr e n. 3 sondaggi geognostici alla profondità di 30 m da p.c. e 3 prove geofisiche MASW.

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 5 di 45

2. NORME E RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

2.1. NORMATIVE DI RIFERIMENTO

- D.M. 14/01/2008 - Norme tecniche per le costruzioni.
- Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 – Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Istruzioni per l'applicazione delle «Nuove norme tecniche per le costruzioni» di cui al decreto ministeriale 14 gennaio 2008.
- “MANUALE DI PROGETTAZIONE DELLE OPERE CIVILI” - RFI DTC SICS MA IFS 001 A del 29.12.2015;
- Butterfield, R. (1979). A natural compression law for soils (an advance on e-log p'), *Géotechnique* 29, 469-480.
- Bowles, J. (1998), “*Fondazioni progetto e analisi*”, Mc Graww-Hill.
- Lancellotta, R. (1987), “*Geotecnica*”, Zanichelli.
- Viggiani, C. (1999), “*Fondazioni*”, Hedilius.
- Associazione Geotecnica Italiana - Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - Giugno 1977.
- Associazione Geotecnica Italiana - Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio – Gennaio 1994.

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 6 di 45

3. INDAGINI GEOTECNICHE ESEGUITE

Al fine di fornire la caratterizzazione del terreno presente nell'area di intervento sono state condotte le seguenti indagini:

- CAMPAGNA INDAGINI ITALFERR 2019 (PFTE QUADRUPPLICAMENTO BRESCIA EST)

A supporto della progettazione è stata condotta una campagna di indagini geognostiche e geofisiche nel mese di aprile 2019, comprendente l'esecuzione di n. 2 sondaggi a carotaggio continuo, n. 3 prove M.A.S.W., n. 3 prove di sismica passiva HVSr. n. 1 prova penetrometrica dinamica DPSH di profondità fondo foro pari a 8m.

- CAMPAGNA INDAGINI ITALFERR 2018 (PFTE TRAMVIA DI BRESCIA)

Da tale campagna di indagine è stato considerato n. 1 sondaggio da 40m eseguito nel 2018 a supporto della progettazione della tramvia di Brescia.

- CAMPAGNA INDAGINI ITALFERR 2013 (AV-AC MI-VR MITIGAZIONE ACUSTICA)

A supporto del presente studio sono stati considerati n. 2 sondaggi da 30m eseguiti nel 2013.

- POZZI PER ACQUA (GEOPORTALE DELLA LOMBARDIA E BANCA DATI DELL'ISPRA)

A supporto del presente studio sono state considerate le stratigrafie di pozzi per acqua ottenute tramite il Geoportale della Regione Lombardia e dalla banca dati dell'ISPRA,

In tutti i sondaggi condotti sono state eseguite prove di tipo SPT, letture piezometriche e nelle ultime due campagne di indagine sono state condotte prove di tipo Lefranc per la determinazione della permeabilità.



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA
Lotto funzionale **QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA**

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOW	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	7 di 45

3.1. UBICAZIONE DEI SONDAGGI

Di seguito si riporta la localizzazione dei sondaggi eseguiti:

Sondaggio	Latitudine	Longitudine	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m)	Attrezzatura
N1	45°31'44.332"	10°14'41.28"	127.2	30.0	Piezometro Norton 3"
N3	45°30'13.832"	10°18'31.909"	141.4	30.0	Piezometro Norton 3"

Tabella 2-1 – Sondaggi campagna Italferr 2019

Sondaggio	Latitudine	Longitudine	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m)	Attrezzatura
S3	45°30'58.97"	10°16'46.52'	135,25	40.0	Piezometro T.A. 3"

Tabella 2-2 – Sondaggi campagna Italferr 2018

Sondaggio	Latitudine	Longitudine	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m)	Attrezzatura
S1	45°31'46.10"	10°13'27.53"	135.0	30,0	Piezometro Norton 2"
S2	45°31'45.55"	10°13'34.91"	136.0	30,0	Piezometro Norton 2"

Tabella 6-3 – Sondaggi campagna Italferr 2013

Di seguito si riporta la localizzazione planimetrica dei sondaggi



Pozzo	Latitudine	Longitudine	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m)
D6C164682313	44°59'13.592"	10°44'49.70"	129,27	162
D6D243828534	45°29'26.484"	10°20'07.80"	141	25
D6D248308273	45°29'23.77"	10°20'28.23"	143	25
D6D252818007	45°29'14.91"	10°20'48.80"	143,5	24,9

Tabella 6-4 – Pozzi per acqua (Geoportale della Lombardia)



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA

Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOW	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	9 di 45

3.2. SONDAGGI GEOGNOSTICI E VALORI DI SPT

Di seguito si sintetizzano i risultati delle prove Nspt per le diverse campagne di indagine.

Tabella 6-5 – Valori di Nspt registrati nei sondaggi Italferr 2019

Profondità (m da p.c.)	N1	N3
1,0	9	
3,8		32
4,5		
6,0	26	
7,0		R
8,5	20	
9,8		65
11,4	27	
12,6		R
13,7	30	
16,0	22	
16,7		70
22,7		63
24,7	43	
27,0		R
27,3	R	
29,1	R	

 ITOLFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
	Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A

Tabella 6-6 – Valori di Nspt registrati nei sondaggi Italferr 2019

Profondità (m da p.c.)	S3
4,5	51
9,0	35
13,5	64
18,0	47
22,5	34

Tabella 6-7 – Valori di Nspt registrati nei sondaggi Italferr 2013

Profondità (m da p.c.)	S1	S2
3,0		R
3,5	75	
8,0		50
8,7	49	
13,3		41
14,8	39	
17,8		39
20,8	43	
25,3		61
26,8	49	

3.3. INDAGINI SISMICHE

In corrispondenza del sito in esame, sono state condotte delle indagini geofisiche di tipo MASW con lo scopo di determinare i valori della velocità media di propagazione delle onde di taglio $V_{s,30}$ e la categoria di sottosuolo, in accordo con quanto previsto dal 3.2.2 del NTC 2008 "D.M. 14.01.2008 Norme Tecniche per le Costruzioni.

3.4. PROVE DI PERMEABILITA'

Si riporta il risultato delle prove di permeabilità Lefranc.

Tabella 6-8 – Valori di permeabilità registrati nei sondaggi Italferr 2019

SONDAGGIO	Profondità prova (m da p.c.)	K (m/s)
S3		
8,6	8,6	4.29E-05
14,7	14,7	1.22E-05

Tabella 6-9 – Valori di permeabilità registrati nei sondaggi Italferr 2013

Sondaggio	Profondità prova (m da p.c.)	K (m/s)
S1	9,0	2.37E-05
S1	20,5	2.13E-05
S2	8,5	2.77E-05
S2	24,0	2.04E-05

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 13 di 45

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La successione stratigrafica è stata desunta sulla base delle indagini eseguite e dai rilievi e studi geologico-geomorfologici.

Nel seguito vengono definite le unità geotecniche intercettate.

4.1. DEFINIZIONE DELLE UNITA' GEOTECNICHE INTERCETTATE

Sulla base dei risultati delle indagini, si perviene ad una caratterizzazione geotecnica dei terreni e quindi alla definizione della stratigrafia e dei parametri geotecnici di progetto. La prova DPSH, arrivata ad una profondità di 8 metri, è risultata pressoché concorde con i dati derivanti dal sondaggio geognostico.

Unità geotecniche:

- **Unità R- Riporto:** si tratta del terreno intercettato a partire da p.c.; si distinguono sabbia e ghiaia centimetrica sciolta asciutta di colore grigio nerastro, frammenti di laterizi e ballast, limo argilloso debolmente sabbioso, ghiaia e ciottoli centimetrici.
- **Unità A- Argilla:** si tratta di argilla addensata a tratti plastica di colore grigio bluastro passante a nerastro e grigio con striature giallastre, con presenza di concrezioni calcaree.
- **Unità L/A - limo argilloso:** si tratta di limo argilloso debolmente sabbioso con incusi clasti calcarei da centimetrici a decimetrici di colore marrone rossastro.

Si elencano ora tutti gli esiti delle prove di cui si dispone per ciascuna unità geotecnica individuata:

- **Unità R – Riporto (da 0.00 a 3 m)**
- **Unità G/S- Ghiaia sabbiosa**
- **Unità S/L – Sabbia Limosa**

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 14 di 45

1.1.1 Depositi incoerenti

Per i depositi prevalentemente incoerenti, i parametri geotecnici di resistenza al taglio e di deformabilità possono essere stimati sulla base dell'interpretazione delle prove penetrometriche dinamiche SPT.

Stato di addensamento

Correlazione di Skempton

In accordo a quanto indicato in Skempton (1986), la densità relativa D_r può essere correlata al valore NSPT con la seguente legge:

$$D_r = \left(\frac{1}{A + B \cdot \sigma'_{vo}} \cdot N_{SPT} \right)^{0.5}$$

essendo:

A, B = costanti empiriche indicate in *Tabella 1*;

σ'_{vo} = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova SPT (kg/cm²);

N_{SPT} = numero di colpi per 30 cm di infissione;

D_r = densità relativa (-).

Tipo di materiale	A	B
Sabbie fini normalmente consolidate	27,5	27,5
Sabbie grosse normalmente consolidate	43,3	21,7
Sabbie sovraconsolidate	27,5÷43,3	$(21,7+27,5) \cdot \frac{1+2 \cdot (ko)_{sc}}{1+2 \cdot (ko)_{nc}}$

Tabella 10 – Costanti empiriche A e B (Skempton, 1986)

Nel caso in esame sono state cautelativamente considerate le costanti empiriche relative a sabbie fini normal consolidate.

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 15 di 45

Correlazione di Gibbs e Holtz

In accordo a quanto indicato da Gibbs e Holtz (1957) la densità relativa D_R può essere correlata al valore NSPT con la seguente espressione:

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{(16 + 23 \cdot \sigma_{vo}')}}}$$

Correlazione di Bazaraa

In accordo a quanto indicato da Bazaraa (1967) la densità relativa D_R può essere correlata al valore NSPT con la seguente espressione:

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (1 + 4.1 \cdot \sigma_{vo}')}}} \quad \text{per } \sigma_{vo}' \leq 0.732 \text{ kg/cm}^2$$

$$D_R = \sqrt{\frac{N_{SPT}}{20 \cdot (3.24 + 1.024 \cdot \sigma_{vo}')}}} \quad \text{per } \sigma_{vo}' > 0.732 \text{ kg/cm}^2$$

essendo:

D_R = densità relativa (-).

σ_{vo}' = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova SPT (kg/cm^2);

N_{SPT} = numero di colpi per 30 cm di infissione.

Parametri di resistenza

Per la stima dell'angolo di resistenza al taglio dalle prove SPT sono state utilizzate due diverse correlazioni (Bolton; Schmertmann) di seguito illustrate.

Correlazione di Schmertmann

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 16 di 45

L'angolo di resistenza al taglio (φ') stimato dalle prove SPT in base alla correlazione proposta da Schmertmann (1977) correla l'angolo di resistenza al taglio alla densità relativa attraverso la seguente relazione:

$$\varphi = 38.5 + 0.108 \cdot D_R \quad \text{valida per sabbia e ghiaia poco limosa e ghiaietto uniforme}$$

$$\varphi = 34.5 + 0.10 \cdot D_R \quad \text{sabbia grossa-media uniformemente ben gradata}$$

$$\varphi = 31.5 + 0.115 \cdot D_R \quad \text{sabbia medio-fine uniformemente ben gradata}$$

$$\varphi = 28.0 + 0.14 \cdot D_R \quad \text{sabbia fine uniforme}$$

essendo: D_r = densità relativa

Nel caso in esame si è considerata la correlazione valida per sabbia fine uniforme.

Correlazione di Bolton

L'angolo di resistenza al taglio di picco φ' è stato determinato in accordo al metodo proposto da Bolton (1986):

$$\varphi' = \varphi'_{cv} + m \cdot Dl$$

$$Dl = D_r \cdot [Q - \ln(p_f')] - 1$$

essendo:

φ'_{cv} = angolo di attrito di picco riferito a pressioni di 272 kPa (°);

Q = fattore che dipende dalla composizione mineralogica e dalla forma delle particelle di sabbia, valore consigliato = 10;

$p_f' = 1.4 \cdot \sigma_{ff}'$ kPa (vedasi Jamiokowski et al., 1988; in accordo a quanto proposto da Baligh, 1975, si assume $p_f' = 1.4 \cdot 272 = 380$ kPa);



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA
Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOW	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	17 di 45

m = costante empirica dipendente dalle condizioni di deformazione prevalenti (vedasi tabella seguente (°). Nel nostro caso si assume $m=3$;

D_r = densità relativa (-).

Condizioni di rottura	m
Tipo prova triassiale di compressione ($\sigma_2' = \sigma_3'$)	3
Tipo prova triassiale in estensione o di deformazione piana ($\sigma_2' \neq \sigma_3'$)	5
σ_2' = tensione principale efficace intermedia σ_3' = tensione principale efficace minore	

Tabella 11: Valori della costante empirica m secondo Bolton (1986)

I valori dell'angolo di attrito φ_{cv}' sono stati ricavati in base a quanto indicato nella tabella seguente (Youd, 1972; Stroud, 1988) e sulla base delle prove di taglio diretto in laboratorio eseguite sui campioni prelevati. Nel caso specifico per l'angolo di attrito φ_{cv}' si è assunto, cautelativamente:

$\varphi_{cv}' = 33^\circ$ per le sabbie con ghiaia;

$\varphi_{cv}' = 30^\circ$ per le sabbie.

	Sabbie ben gradate	Sabbie uniformi
Sabbie a spigoli vivi	$\varphi_{cv}' = 38^\circ$	$\varphi_{cv}' = 34^\circ$
Sabbie a spigoli arrotondati	$\varphi_{cv}' = 33^\circ$	$\varphi_{cv}' = 30^\circ$

Tabella 12 Valori dell'angolo di attrito φ_{cv} per sabbie silicee secondo quanto riportato in Stroud (1988) e Youd (1972)

Correlazione Road Bridge Specification

$$\varphi = \sqrt{15 \cdot N_{SPT}} + 15$$

Per sabbie e sabbie fini limose

Correlazione De Mello (1971):

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 18 di 45

$$\phi' = 19 - 0.38\sigma'_v + 8.73 \log(N_{pt})$$

dove σ'_v è la pressione efficace in kg/cm² e N_{NSPT} il numero di colpi medio misurato.

La relazione è valida per le sabbie in genere e per qualunque profondità (tranne che per i primi 2 m sotto il p.c.). E' da considerarsi inattendibile però per valori di ϕ' superiori a 38°.

Correlazione di Meyerhof (1965)

$$\phi' = 23,7 + 0,57N_{spt} - 0,006 N_{spt}^2 \quad (>5\% \text{ limo})$$

$$\phi' = 29,47 + 0,46N_{spt} - 0,004 N_{spt}^2 \quad (<5\% \text{ limo})$$

Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi incoerenti possono essere stimate, in ordine di importanza:

- sulla base dei risultati delle indagini sismiche;
- 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:

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

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

essendo:

γ_t = peso di volume naturale del terreno in assunto pari a 19 kN/m³;

ν = coefficiente di Poisson del terreno (assunto pari a 0.3);

V_s = velocità delle onde di taglio in m/sec.

La velocità delle onde di taglio (V_s) può essere ricavata direttamente dai risultati delle prove geofisiche in foro di sondaggio o indirettamente, interpretando i risultati delle prove SPT attraverso la correlazione di Ohta e Goto (1978) o la correlazione di Yoshida e al. (1988).

Correlazione di Ohta e Goto (1978)

$$V_s = C \cdot (N_{SPT})_{50\%}^{0.171} \cdot (z)^{0.199} \cdot f_A \cdot f_G \text{ (m/sec)}$$

essendo:

$$C = 53.3;$$

z = profondità dal p.c. in metri;

f_A = coefficiente funzione dell'epoca geologica del deposito (vedasi la Tabella 4);

f_G = coefficiente funzione della composizione granulometrica (vedasi la Tabella 5).

f_A	Olocene	Pleistocene
	1,0	1,3

Tabella 13 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 14 Relazione di Ohta e Goto, 1978 - Coefficiente f_G (funzione della granulometrica del deposito)

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 20 di 45

Correlazione di Yoshida et al. (1988)

$$v_s = C \cdot (N_{SPT})^{0.25} \cdot (\sigma_v')^{0.14} \text{ (m/sec)}$$

essendo:

C=49 per sabbie fini ;

C=56 per sabbie grosse con almeno il 25% di ghiaia;

C=60 per 50% di ghiaia.

σ_{vo}' = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova.

Correlazione di Schultze

$$E(\text{kg/cm}^2) = 5.27 N_{spt} + 76 \text{ sabbie}$$

Correlazione di Pasqualini (Politecnico di Torino, 1983)

$$E = B \sqrt{N_{SPT}}$$

Con B= 7 MPa

I moduli di deformabilità “operativi” (E') da adottare per le opere di sostegno e per le fondazioni, saranno assunti pari a 1/3÷1/5 di quello iniziale (E₀) oppure pari a quello desumibile dalle correlazioni empiriche.

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 21 di 45

1.1.2 Depositi coesivi

Per i depositi coesivi la caratterizzazione geotecnica è stata fatta oltre che dall'interpretazione delle prove in sito, anche dai risultati delle prove di laboratorio sui campioni prelevati nei sondaggi.

Classificazione

La classificazione di questi terreni avverrà essenzialmente sui risultati delle seguenti prove di laboratorio:

- Analisi granulometriche;
- pesi di volume naturale e secco;
- contenuti d'acqua naturale;
- limiti di Atterberg;

Caratteristiche di resistenza

Per i depositi coesivi la caratterizzazione geotecnica è stata fatta oltre che dall'interpretazione delle prove in sito, anche dai risultati delle prove di laboratorio sui campioni prelevati nei sondaggi.

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza al taglio non drenata dei depositi coesivi ci si è basati:

- sugli esiti delle prove speditive di Pocket Penetometer (PP), correlazione k pari a 0,5 secondo la seguente relazione:

$$c_u = k \cdot p_p$$

- sugli esiti delle prove penetrometriche dinamiche SPT in base alla seguente correlazione di Stroud (1974):

$$c_u \cong (5.0 \div 5.5) \cdot N_{SPT} \quad (\text{kPa})$$

In assenza di prove di laboratorio, una stima dell'angolo di resistenza al taglio per i depositi coesivi è data dalla correlazione di Flavigny in funzione dell'indice di plasticità del materiale:

$$\text{sen } \phi' = 0.58 - 0.0040 PI$$

particolarmente adatta nel caso di argille normalconsolidate (si veda il grafico nella Figura seguente)

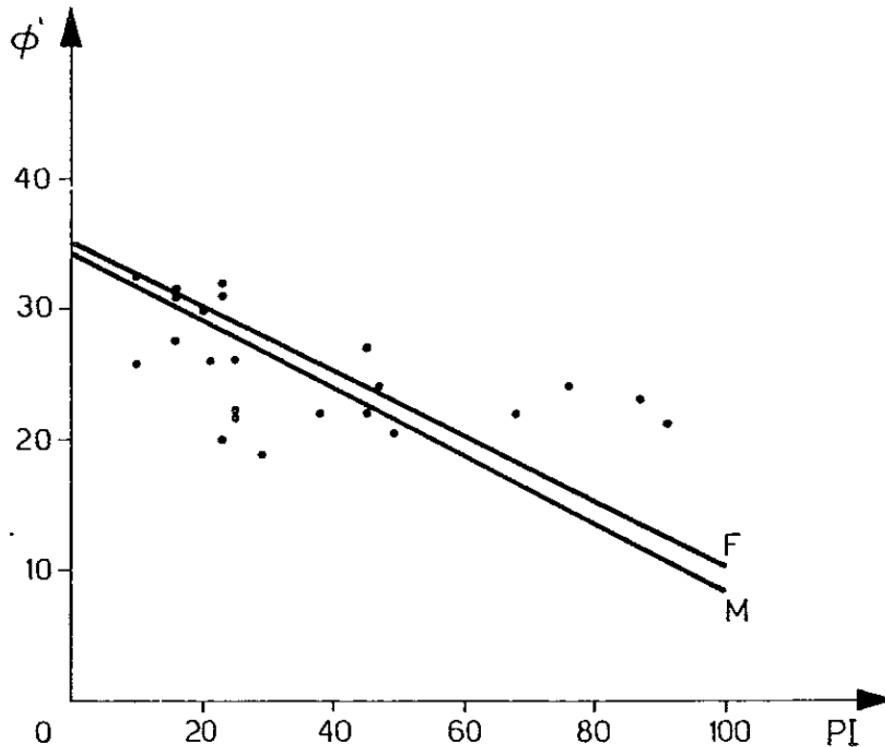


Figura 1: Andamento dell'angolo ϕ' in funzione dell'indice di plasticità per un'argilla normalconsolidata

Caratteristiche di deformabilità

Le caratteristiche di deformabilità dei depositi coesivi possono essere stimati:

- dalle prove edometriche di laboratorio;
- da correlazioni di letteratura.

Dalle prove edometriche di laboratorio generalmente si ottengono bassi valori del modulo di deformazione, in quanto la prova di laboratorio può essere affetta da errori sistematici legati alla strumentazione, alla qualità del campionamento e/o al rimaneggiamento in fase di confezionamento provino. Quindi in linea generale, quando disponibili, si è dato maggior peso ai moduli derivanti da indagini sismiche (misure dirette ed in continuo, nel qual caso prove DH), o dall'interpretazione di prove SPT.

Il valore del modulo di deformazione elastico (E'_v) per terreni coesivi sovraconsolidati può anche essere stimato con la seguente correlazione (Stroud, 1974):

$$E'_v = 130 \cdot cu = 130 \cdot f_1 \cdot N \quad [\text{kPa}]$$

Dove:

E'_v = modulo di deformazione operativo (kPa)

cu = resistenza al taglio non drenata (kPa);

f_1 = fattore in funzione dell'indice di plasticità IP, (vedasi figura seguente), assunto pari a 5;

N = valori di N_{SPT} .

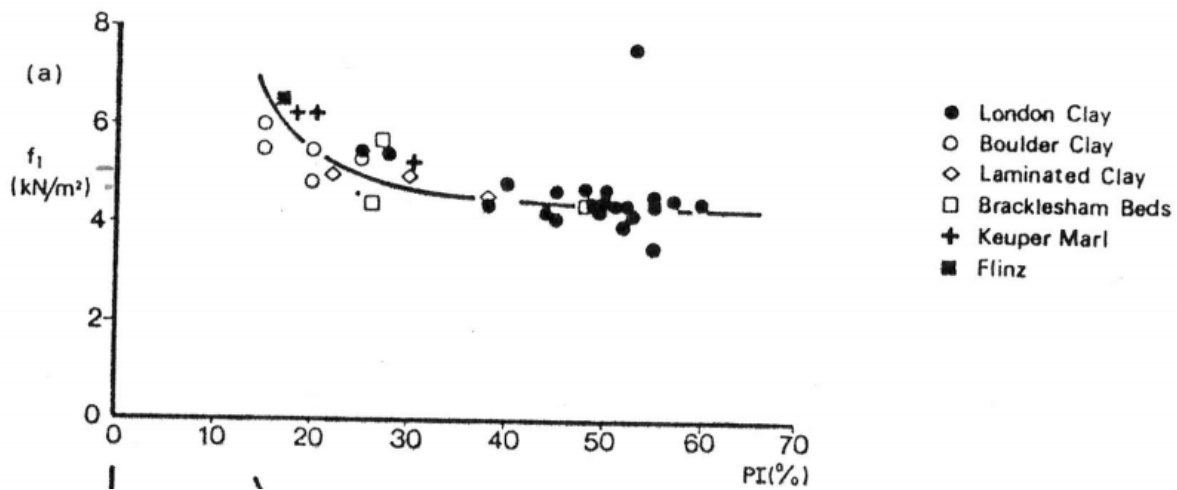


Figura 2 – Fattore f_1 in funzione di IP

Sulla base di quanto riportato in Simpson et al. (1979) il modulo di taglio iniziale (G_0) può essere stimato anche sulla base della seguente equazione:

$$G_0 = (500 \div 700) \cdot cu \quad (\text{kPa})$$

 ITALFERR GRUPPO FERROVIE DELLO STATO ITALIANE	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
	Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A

essendo:

c_u = resistenza al taglio non drenata.

I moduli di deformabilità “operativi” (E') da adottare per il calcolo delle deformazioni/cedimenti delle opere di sostegno e delle fondazioni, saranno assunti pari a $1/3 \div 1/5$ di quello iniziale (E_0).

Nel caso di valutazione di cedimenti di rilevati, i moduli elastici “operativi” saranno assunti pari a $1/10$ di quello iniziale.

Nella valutazione dei cedimenti immediati dei rilevati il modulo di deformazione in condizioni non drenate (E_u) può essere stimato sulla base della correlazione empirica proposta da Duncan & Buchignani (1976) $E_u = k \cdot c_u$; il coefficiente k è valutato con il grafico di figura seguente.

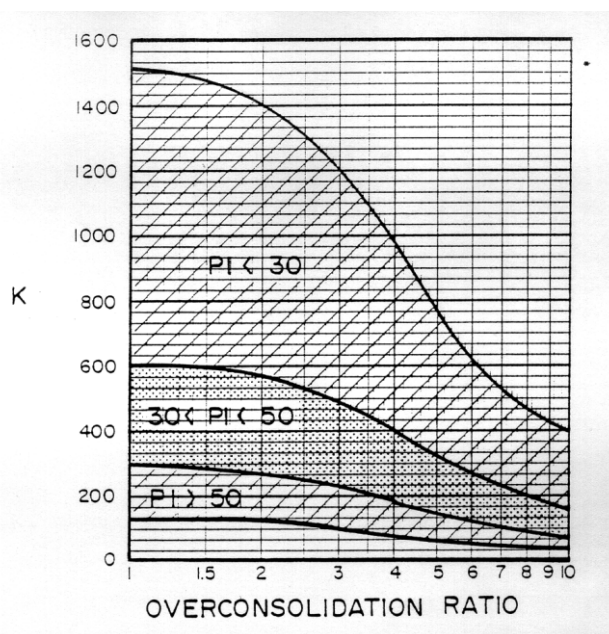


Figura 3 – Duncan & Buchigani

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 25 di 45

Caratteristiche di consolidazione

I valori del coefficiente di consolidazione primaria verticale sono stati determinati dalle prove edometriche di laboratorio e confrontati con i valori derivanti dalla seguente correlazione (manuale NAVFAC-DM 7.1. ,1971), in funzione del limite liquido (LL):

$$c_v = 0.009 (LL - 0.1) \quad [\text{cm}^2/\text{s}]$$

Il valore del coefficiente di consolidazione primaria assunto in progetto, andrà valutato tenendo conto che i risultati delle prove di laboratorio sono scarsamente rappresentativi del reale comportamento del terreno in quanto si tratta di prove eseguite su campioni di piccole dimensioni e quindi non tengono conto della eterogeneità nella composizione granulometrica dell'ammasso e dell'influenza delle condizioni del drenaggio, oltre che dal possibile disturbo del campione in fase di prelievo e/o confezionamento. A tal proposito si richiamano le esperienze di Bughignoli e Calabresi, 1975) mostrate in figura seguente.

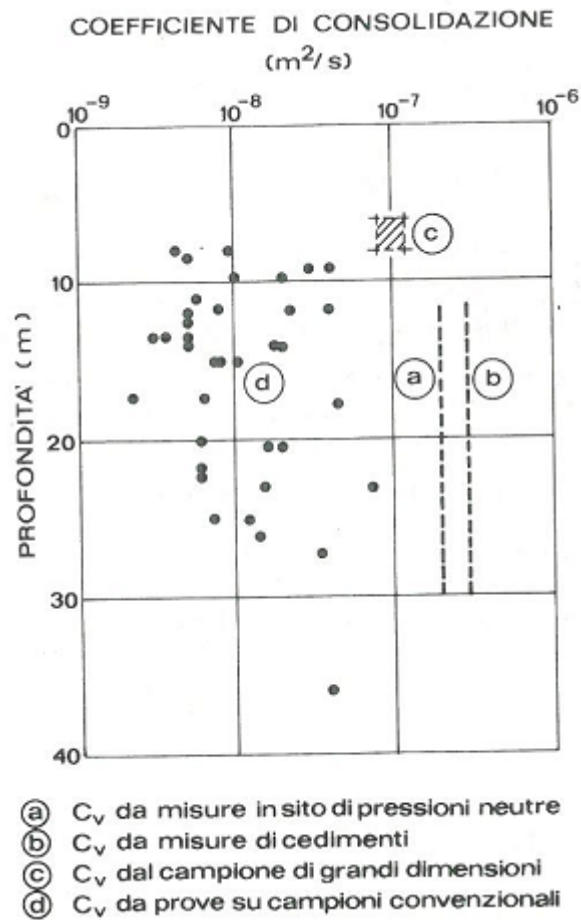


Figura 4 – confronto tra valori di c_v ottenuti con diverse prove (Bugnignoli e Calabresi, 1975)

Per quanto riguarda i coefficienti di consolidazione secondaria, si è fatto uso del metodo di determinazione proposto nel NAVFAC-DM 7.1 (1982, Figura successiva), che correla il coefficiente di consolidazione secondaria al contenuto naturale di acqua.

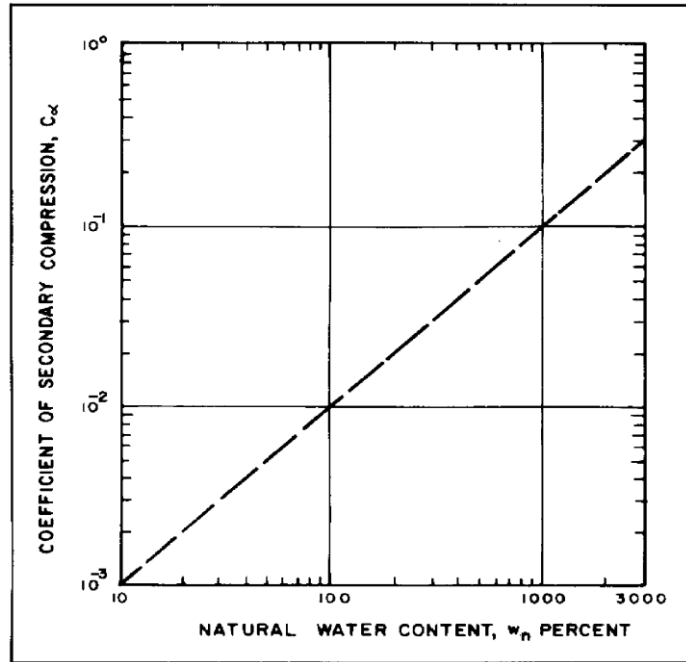


Figura 5: Abaco di calcolo del coefficiente di consolidazione secondaria da w_n (NAVFAC, 1982)

4.2. UNITA' GEOTECNICA R

Tale unità si rinviene nel sondaggio dal p.c. a 3.0 m. Sulla base di dati da letteratura, si assumono cautelativamente i seguenti valori per la caratterizzazione geotecnica del terreno di riporto:

UNITA' R:

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale;

$\phi' = 28^\circ$ angolo di resistenza al taglio;

$c' = 0 \text{ KPa}$ coesione drenata;

$E' = 8\text{-}10 \text{ MPa}$



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA

Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN0W	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	28 di 45

4.3. UNITA' GEOTECNICA G/S

Questa unità è stata rilevata in tutti i sondaggi effettuati. Cautelativamente la caratterizzazione è stata condotta considerando il sondaggio N1 con un valore medio di N_{spt} pari a 24 assunto convenzionalmente a -10m da p.c.

UNITA' G/S:

$\gamma = 18-19 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale;

$\phi' = 30^\circ$ angolo di resistenza al taglio;

$c' = 0 \text{ KPa}$ coesione drenata;

$E' = 15-20 \text{ MPa}$

$c_u = 0 \text{ KPa}$ coesione non drenata

4.4. UNITA' GEOTECNICA S/L

Cautelativamente la caratterizzazione è stata condotta considerando il sondaggio N1 con un valore medio di N_{spt} pari a 40 assunto convenzionalmente a -24m da p.c.

UNITA' S/L:

$\gamma = 18-19 \text{ kN/m}^3$ peso di volume naturale;

$\phi' = 32^\circ$ angolo di resistenza al taglio;

$c' = 0 \text{ KPa}$ coesione drenata;

$E' = 20-40 \text{ MPa}$

$c_u = 0 \text{ KPa}$ coesione non drenata

Nella tabella seguente, si riassumono le caratteristiche geotecniche di progetto:

UNITA'	γ [kN/m ³]	ϕ' [°]	c' [kPa]	c_u [kPa]	E' [MPa]
R	19.0	28-30°	0	-	8-10
G/S	18.0÷19.0	30°	0	-	15-20
S/L	18.0÷19.0	32°	0	-	20/40

5. FALDA

Per quanto concerne il livello della falda è possibile ricostruirne l'andamento sia utilizzando la cartografia tematica del Piano di Governo del territorio, sia utilizzando i dati bibliografici a disposizione. Seguendo l'andamento delle linee isofreatiche della carta idrogeologica del comune di Brescia (in Figura 3-12), relative a gennaio 1994, nella zona orientale queste aumentano da E a W lungo la tratta di interesse (da 116 a 120m s.l.m.). Proseguendo verso il comune di Rezzato, le linee isofreatiche, riferite a febbraio 200, tendono a diminuire raggiungendo valori di 117 m s.l.m., per poi aumentare di circa 1 m entro la fine del comune (Figura 3-14). L'ultima parte del tracciato in esame, ricadente nel comune di Mazzano, presenta un livello isofreatico (riferito a febbraio 2004) pressoché costante (117 m s.l.m. visibile in Figura 3-16). Nell'elaborato IN0W00R69N4GE0002001A redatto a corredo del presente studio, e comprendente il profilo idrogeologico elaborato lungo la tratta, è possibile osservare il livello della superficie piezometrica, la quale rimane pressoché costante lungo tutta la tratta. Per quanto concerne i sondaggi realizzati per la presente fase progettuale ed i sondaggi bibliografici a disposizione, i dati relativi al livello di falda disponibili sono riportati in Tabella 3-1. Si ricorda che tali dati sono stati registrati in corso di perforazione, e quindi potrebbero essere soggetti ad errori dovuti alla non ancora avvenuta stabilizzazione della falda.

Tabella 3-15 – Livelli di falda registrati durante l'esecuzione dei sondaggi

Sondaggio	Anno	Livello di falda (m da p.c.)	Quota falda (m s.l.m.)
N1	2019	-12.3	114.9
N3	2019	Falda assente (profondità sondaggio 30 m)	n.d.
S1	2013	-19.10	118.5

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 30 di 45

S2	2013	-17.70	112.3
----	------	--------	-------

6. CLASSIFICAZIONE SISMICA E STABILITA' DEL SITO

Per quanto concerne la classificazione sismica del territorio in esame si è fatto riferimento a quanto previsto dalla NTC 2018 "D.M. 17.01.2018 Norme Tecniche per le Costruzioni.

6.1. Definizione dell'azione sismica di progetto

La definizione dell'azione sismica di progetto per l'opera segue quanto disposto dalle NTC 2018. In particolare, l'azione sismica in base alla quale va valutato il rispetto dei diversi Stati Limite per le strutture in progetto (di esercizio – SLE e Ultimi - SLU) deve essere definita a partire dalla "pericolosità sismica di base" del sito di costruzione, a sua volta esprimibile 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 comprende la determinazione delle ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione S_e (T) con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R per la vita utile della struttura. Data la probabilità di superamento nel periodo temporale di riferimento, funzione dello Stato Limite considerato per la verifica, 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.

In allegato al Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14 gennaio 2008, i valori dei suddetti parametri sono forniti per ognuno dei 10751 nodi del reticolo di riferimento che copre il territorio nazionale. I valori corrispondenti a punti intermedi alla griglia si ottengono per interpolazione sui quattro punti adiacenti. Per definire i valori della pericolosità sismica di base, sono stati scelti 3 punti di interesse lungo il tracciato sede delle opere (inizio, punto intermedio e fine tracciato, i.e. P_1 , P_2 e P_3 in Figura 7-2). In Tabella 7-1, si riporta l'identificativo dei nodi del reticolo di riferimento entro cui è compreso il punto di calcolo dell'azione sismica (elaborazione da foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v.1.0.3b, distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2009) per ognuno dei 3 punti di interesse.

Il confronto fra i valori del parametro a_g ai diversi punti di riferimento, per i diversi stati limite, riportati in Tabella 7-2, mostra come la variabilità dell'input sismico lungo l'estensione del tracciato sia tutto sommato ridotta. Pertanto, si è assunto quale riferimento per la definizione della pericolosità sismica per tutta l'estensione dell'opera, il punto P_3 , di pericolosità (leggermente) superiore.

Tabella 7-16 – Nodi del reticolo di riferimento nell'intorno di punti scelti lungo il tracciato. Elaborazione da foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v. 1.0.3b, distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici, 2009.

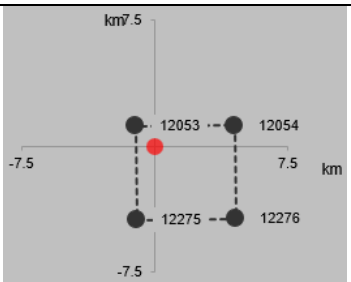
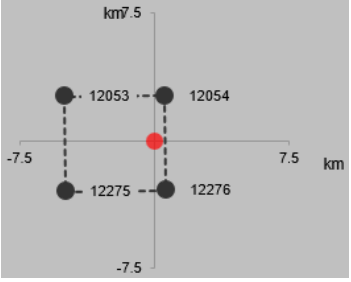
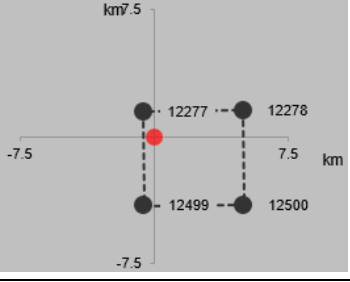
ID Punto	Longitudine	Latitudine	Localizzazione punti di griglia
P1 – Inizio tracciato	10.224298°	45.530050°	
P2 – Intermedio	10.275142°	45.518477°	
P3 – Fine tracciato	10.363644°	45.481140°	

Tabella 7-17 – Valori del parametro a_g per gli stati limite di riferimento per i siti di progetto (ottenuti attraverso l'impiego del foglio di calcolo Spettri-NTCver.1.0.3.xls, CSLLPP (2009)) per $V_R = 112.5$ anni.

SL	T_R [anni]	a_g [g]		
		P_1	P_2	P_3
SLO	68	0.063	0.063	0.064
SLD	113	0.081	0.082	0.083
SLV	1068	0.200	0.205	0.211

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 32 di 45

SLC	2193	0.257	0.263	0.268
------------	------	-------	-------	-------

Vita nominale, vita utile e periodi di ritorno dell'azione sismica

La Vita Nominale V_N di un'opera, intesa come il periodo temporale entro cui l'opera stessa possa 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, i progettisti hanno assunto:

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

Con riferimento alle conseguenze di un'interruzione di operatività o di un eventuale collasso in presenza di azioni sismiche, le opere sono suddivise dalle NTC2018 in classi d'uso, la cui appartenenza è stabilita in base all'importanza dell'opera rispetto alle esigenze di operatività a valle di un evento sismico. Nel caso in esame, sulla base delle indicazioni dei progettisti, le opere appartengono alla Classe d'Uso III, ossia:

“Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso IV. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.”.

Pertanto, sulla base delle indicazioni NTC2018, alla Classe d'Uso III corrisponde un coefficiente d'uso C_U pari a:

$$C_U = 1.5$$

Il periodo di riferimento V_R si ottiene moltiplicando la vita nominale V_N per il coefficiente d'uso C_U . Nel caso in esame:

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

L'azione sismica di progetto va quindi determinata in funzione degli Stati Limite di verifica ed alle corrispondenti probabilità P_{VR} di realizzarsi nel periodo di riferimento V_R .

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

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 33 di 45

- Stati Limite Ultimi (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.

- Stati 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:

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

Nel caso in esame, i valori di periodo di ritorno dell'azione sismica, per i diversi Stati Limite, sono indicati in Tabella 7-3.

I valori di a_g (accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale), F_0 (valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione lungo il tratto orizzontale) e T_{c^*} (periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale), per il punto di interesse e i periodi di interesse, sono riportati nella sopraccitata Tabella 7-3.

Tabella 7-18 – Valori dei parametri a_g , F_0 , T_{c^*} per gli stati limite di riferimento (ottenuti attraverso l'impiego del foglio di calcolo Spettri-NTCver.1.0.3.xls, CSLLPP (2009)) per $V_R = 112.5$ anni.

SL	T_R (anni)	a_g (g)	F_0 (-)	T_{c^*} (s)
SLO	68	0.064	2.482	0.250
SLD	113	0.083	2.454	0.258
SLV	1068	0.211	2.452	0.277
SLC	2193	0.268	2.474	0.282



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA

Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
INOW	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	34 di 45

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 35 di 45

Risposta sismica locale

Le NTC2018 definiscono il fattore di sito S come funzione sia della categoria di sottosuolo (S_s), sia dell'andamento della superficie topografica (attraverso il coefficiente S_T):

$$S = S_s \cdot S_T$$

La classificazione del sottosuolo si conduce in base alle condizioni stratigrafiche ed al valore equivalente di velocità di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ (in m/s), definito dall'espressione:

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

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.

La campagna di indagini geofisiche e geotecniche eseguita nel tratto di interesse (cfr doc. D14U01D69IGGE0005001A) ha compreso l'esecuzione di tre prove SPT in sondaggio N1 e N3 e tre indagini sismiche di superficie con metodologia MASW (MASW1, MASW2 e MASW3), disposte lungo il tracciato come da Figura 7-2.

A supporto del presente studio, sono stati considerati: un sondaggio eseguito nel 2018 per il progetto della tramvia di Brescia (S3 nella Figura 7-2) e n.2 sondaggi eseguiti nel 2013 (rispettivamente S1 e S2 in Figura 7-2). Inoltre, sono state utilizzate, ai fini della classificazione stratigrafica, N. 5 prove geofisiche di tipo MASW eseguite nel 2018 per il Progetto Definitivo del Piano di Risanamento Acustico (MASW1-S, MASW2-S, MASW3-S, MASW4-S e MASW5-S nella Figura 7-2).

I risultati delle prove MASW dalla campagna indagini di 2019, concentrate nella seconda parte del tracciato, restituiscono un valore equivalente di velocità di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$, compreso nell'intervallo 405-4463 m/s (Categoria di suolo B da Tabella 7-4). Per contro, i risultati ricavati dalle prove di MASW eseguite nel 2018 nella prima parte del tracciato, assegnano un valore del parametro $V_{s,eq}$ compreso tra 272 e 342 m/s (Categoria di suolo C da Tabella 7-4).

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 36 di 45

Dalle sezioni geologiche lungo il tracciato di interesse, si osserva la presenza maggiore di uno strato di limo argilloso sabbioso nella prima parte del tracciato (il tratto A₁, dall'inizio di tracciato, punto P₁ con Prog. 94+680, fino al punto P₂ con Prog. 98+970 nella Figura 7-2), associabile ad un sottosuolo di categoria C. Nella seconda parte del tracciato (il tratto A₂, dal punto P₂ con Prog. 98+970 al punto P₃ con Prog. 105+384), tale strato risulta sostituito da una formazione di ghiaia sabbiosa con ciottoli, a spiegare l'incremento di velocità media di propagazione delle onde di taglio rilevato dalle prove MASW; confermando pertanto il sottosuolo nella categoria B.

Tabella 7-19 – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato. (Tabella 3.2.II delle NTC2018).

Suolo	Descrizione geotecnica
A	Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Inoltre, i risultati ricavati dalle correlazioni empiriche tra valori N_{SPT} e V_S nel sondaggio N1 confermano la categoria di suolo C per la prima parte del tracciato (denominato **tratto A₁**) mentre i risultati dalle prove SPT nel sondaggio N3 convalidano la categoria di suolo B per la seconda parte del tracciato (denominato **tratto A₂**).

I coefficienti S_S per le categorie di sottosuolo B e C si ottengono dalla seguente espressione (vedi Tabella 3.2.IV del par. 3.2.3 delle NTC2018):

$$S_S = 1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_o \cdot a_g / g \leq 1.20 \quad (\text{Suolo B})$$

$$S_S = 1.00 \leq 1.70 - 0.60 \cdot F_o \cdot a_g / g \leq 1.50 \quad (\text{Suolo C})$$

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 37 di 45

Per ciò che concerne l'amplificazione topografica, il sito di progetto si colloca su superficie sostanzialmente pianeggiante (cat. T1 - Superficie pianeggiante e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$, in accordo alla Tabella 3.2.III al par.3.2.2. delle NTC2018). Pertanto, il fattore di amplificazione topografica risulta pari a:

$$S_T = 1$$

Sulla base di quanto sopra, i valori del fattore di sito S e dell'azione sismica di progetto $a_{\max} = S \cdot a_g$ per i periodi di ritorno corrispondenti ai diversi stati limite sono riportati in Tabella 7-5.

Si rimanda al testo delle NTC2018 per ogni altra indicazione, ad esempio in merito alla definizione degli spettri elastici di risposta.

Tabella 7-20 – Valori di a_g (accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale) e dei coefficienti di sito S ($S_T=1$) e accelerazione di progetto a_{\max} per gli stati limite di riferimento (ottenuti attraverso l'impiego del foglio di calcolo Spettri-NTCver.1.0.3.xls, CSLP (2009)) per $V_R = 112.5$ anni per due tratti scelti nel tracciato di progetto.

SL	T_R (anni)	a_g (g)	Tratto A1 (da Prog. 94+680 a Prog. 98+970)		Tratto A2 (da Prog. 98+970 a Prog. 105+384)	
			S (-)	a_{\max} (g)	S (-)	a_{\max} (g)
SLO	68	0.064	1.5	0.096	1.2	0.077
SLD	113	0.083	1.5	0.124	1.2	0.099
SLV	1068	0.211	1.390	0.293	1.193	0.251
SLC	2193	0.268	1.302	0.349	1.135	0.304

6.2. Analisi di pericolosità rispetto al fenomeno della liquefazione

Le NTC2018 al paragrafo 7.11.3.4.2 stabiliscono che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

1. Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero minori di 0.1 g;
2. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
3. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $qc_{1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e qc_{1N} è il valore

della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;

4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone comprese tra le curve rappresentate in Figura 7-8 (coefficiente di uniformità $U_c < 3.5$) e Figura 7-9 (coefficiente di uniformità $U_c > 3.5$).

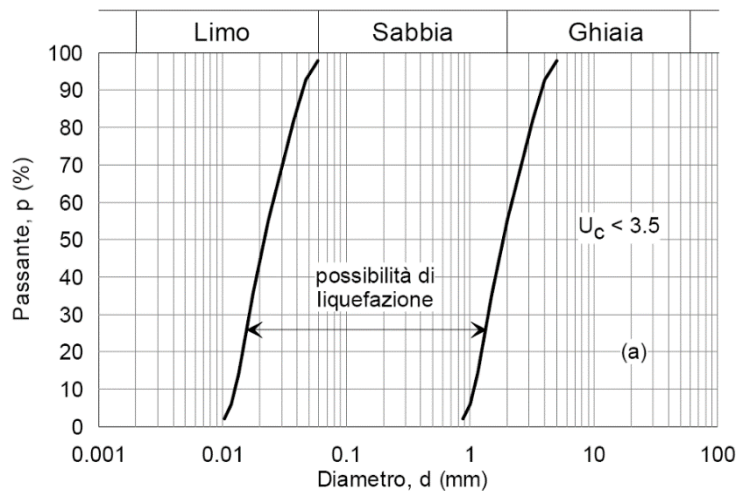


Figura 7-6 – Ambito di potenziale liquefacibilità dei terreni ($U_c < 3.5$).

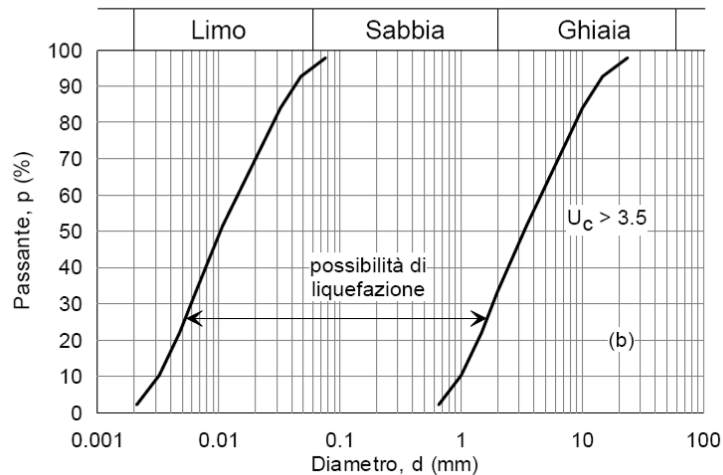


Figura 7-7 – Ambito di potenziale liquefacibilità dei terreni ($U_c > 3.5$).

Per ciò che concerne il valore di magnitudo di riferimento per le verifiche a liquefazione, oltre al quadro sismotettonico esposto ai paragrafi precedenti, può essere considerata l'analisi di disaggregazione dei valori di pericolosità sismica (accelerazione su suolo rigido orizzontale) di cui alle NTC2018, fornita quale elaborazione aggiuntiva direttamente dal progetto INGV-DPC S1 (vedi Figura 7-10), qui considerata per il periodo di ritorno dell'azione sismica corrispondente a quello dello stato limite ultimo di verifica (SLV, cfr. i valori di pericolosità sismica al sito riportati in Tabella 7-5).

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA				
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA				
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA IN0W	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. FOGLIO A 39 di 45

Il risultato di tale analisi svolta per il punto di griglia più prossimo al sito di progetto (N. 12277) per un periodo di ritorno di 975 anni (SLV) mostra come siano dominanti terremoti con valori di magnitudo attorno a 4.0-5.5 ed epicentro a distanza ridotta (0-10 km). I valori medi di magnitudo e distanza da analisi di disaggregazione sono rispettivamente $M=5.01$ e $d=7.69$. Sulla base della sismicità storica, la magnitudo di riferimento è generalmente più elevata. Tenendo conto dei terremoti con maggiore risentimento nell'area del bresciano (cfr. paragrafi precedenti), è ragionevole assumere una magnitudo di riferimento per la verifica a liquefazione pari a **5.7**.

Sulla base del valore di magnitudo sopra determinato, dell'accelerazione massima, dell'altezza di falda e delle caratteristiche dei terreni, nessuno dei criteri di esclusione di cui sopra è verificato e, pertanto, si procederà alla verifica a liquefazione basandosi sui dati delle prove SPT effettuate nei sondaggi disponibili. L'accelerazione di riferimento sarà diversa per i sondaggi N1, S1 e S2n (Categoria di suolo C, $a_{max} = 0.293$ g) e per i sondaggi S3 e N3 ($a_{max} = 0.251$ g).

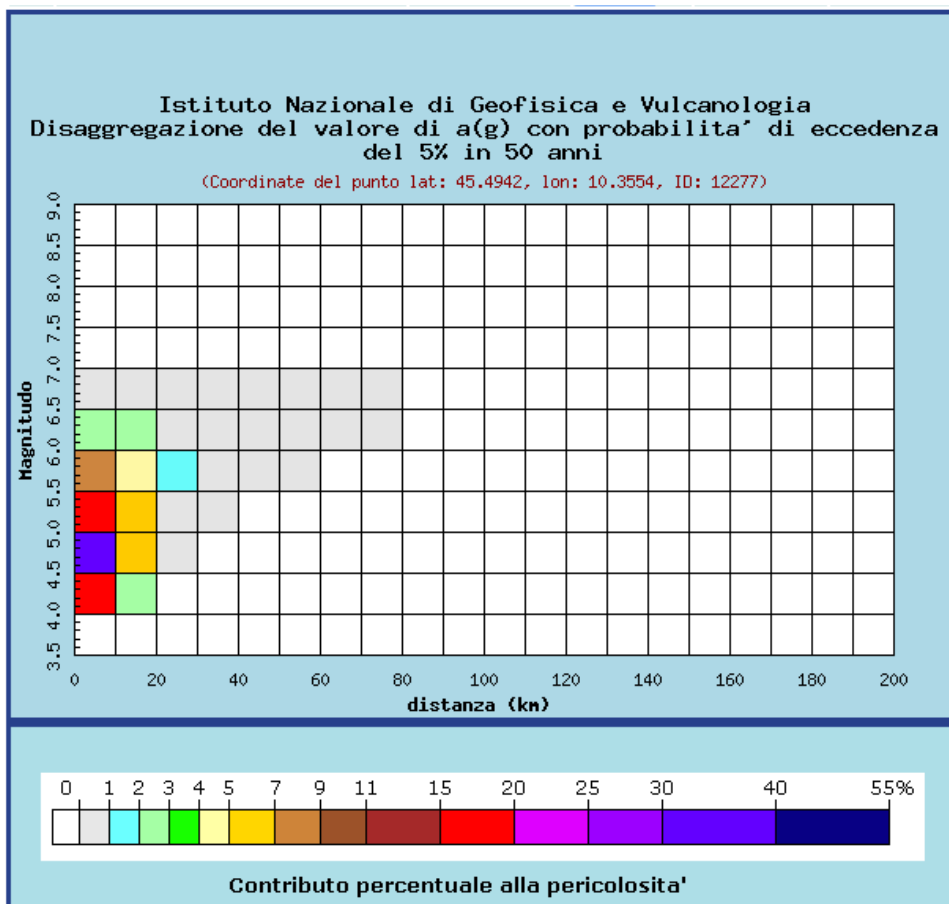


Figura 7-8 – Analisi di disaggregazione del dato di pericolosità al sito di progetto, da elaborazioni DPC-INGV S1 per $T_R = 975$ anni (<http://zonesismiche.mi.ingv.it/>). Punto di griglia N. 12277.

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 40 di 45

1.1.3 Metodo di Analisi

La valutazione del pericolo di liquefazione è stata condotta in accordo al “metodo semplificato” originariamente proposto da Seed e Idriss (1971,1982) e da Seed et al. (1985), confrontando lo sforzo di taglio ciclico normalizzato rispetto alla pressione verticale in sito (CSR) e la resistenza normalizzata del terreno al taglio ciclico (CRR) così definiti:

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Rapporto di tensione ciclica}$$

$$CRR = \frac{\tau_l}{\sigma'_{v0}} \quad \text{Rapporto di resistenza ciclica}$$

Lo sforzo di taglio indotto ad ogni profondità in un sito a superficie piana durante l'evento sismico è dovuto essenzialmente alla propagazione delle onde di taglio polarizzate orizzontalmente. In accordo al metodo utilizzato, la tensione di taglio ciclico indotta dallo scuotimento sismico (sforzo di taglio ciclico normalizzato CSR) viene approssimata da un valore dell'accelerazione pari al 65% della accelerazione di picco a_{max} come segue:

$$CSR = \frac{\tau_c}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max}}{g} \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} r_d$$

dove:

a_{max} accelerazione di picco al sito

g accelerazione di gravità

τ_c valore rappresentativo dello sforzo di taglio ciclico

σ_{v0} tensione verticale alla profondità in esame, in termini di tensioni totali

σ'_{v0} tensione verticale alla profondità in esame, in termini di tensioni efficaci

r_d coefficiente di riduzione dello sforzo di taglio ciclico in funzione della profondità da piano campagna, calcolato come segue in accordo a Blake (Blake, 1996, riportato da Youd et al., 2001):

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 41 di 45

$$r_d = \frac{1 - 0.4113 \cdot z^{0.5} + 0.04052 \cdot z + 0.001753 \cdot z^{1.5}}{1 - 0.4177 \cdot z^{0.5} + 0.05729 \cdot z - 0.006205 \cdot z^{1.5} + 0.00121 \cdot z^2}$$

CSR può essere messo in relazione al numero di cicli significativi dell'azione sismica, funzione della magnitudo M. Per $M \neq 7.5$ (nel caso in esame $M = 5.7$) è necessario introdurre un fattore di scala della magnitudo MSF così definito:

$$MSF = \frac{CSR_M}{(CSR)_{M=7.5}} = \left(\frac{N_{M=7.5}}{N_M} \right)^b$$

dove CSR_M e N_M rappresentano i valori di CSR e numero di cicli equivalenti per il valore di magnitudo di progetto, mentre $(CSR)_{M=7.5}$ e $N_{M=7.5}$ sono riferiti all'evento con $M=7.5$.

Nel presente studio è stato identificato un valore di $MSF = 2.6$ per $M = 5.7$ in accordo sia alle prescrizioni dell'Eurocodice 8 Parte 5, sia a quanto suggerito da Youd et al., 2001 e Idriss e Boulanger (2004).

Il rapporto di resistenza ciclica CRR può essere valutato mediante relazioni empiriche che correlino la sollecitazione sismica ai risultati di prove in sito di tipo SPT, come meglio descritto nel seguito.

1.1.4 CRR da correlazione su prove SPT

Il procedimento qui utilizzato si basa sulla relazione riportata in Figura 7-11, originariamente proposta da Seed e Idriss (1971,1982) e da Seed et al. (1985), e successivamente confermata da Youd et al. (2001).

In Figura 7-11, la resistenza penetrometrica SPT è espressa come numero corretto di colpi $N_{1(60)}$, ossia normalizzato ad una pressione verticale efficace di 100 kPa e corretto per un valore standard di energia trasmessa (60% del valore nominale), come segue:

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

In questa espressione:

C_N = coefficiente correttivo che tiene conto dell'influenza della pressione verticale efficace. In letteratura sono presenti diversi metodi per la valutazione del coefficiente correttivo C_N . Qui è stata applicata la relazione proposta da Liao e Whitman (1986):

$$C_N = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \leq 1.7$$

in cui P_a è la pressione atmosferica, pari a 100kPa, e σ'_{vo} è la tensione verticale in sito, in termini di sforzi efficaci.

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 42 di 45

C_E = coefficiente correttivo che va a considerare il rendimento energetico dell'attrezzatura e riconduce le misure ad un rendimento energetico del 60 % e può essere valutato nel modo seguente:

$$C_E = \frac{ER_m}{60}$$

in cui ER_m è il fattore di rendimento (espresso in %) del trasferimento dell'energia del meglio all'attrezzo campionatore, relativo alla macchina utilizzata per fare la prova; considerando che la configurazione di prova normalmente adoperata in Italia ha un rendimento energetico del 60 %, tale coefficiente è stato posto pari ad 1.

I coefficienti C_B (fattore correttivo per le dimensioni del foro di sondaggio), C_R (fattore correttivo per la lunghezza delle aste della macchina esecutrice) e C_S (fattore correttivo per il tipo di attrezzo campionatore) sono stati assunti pari ad 1 dato che le prove sono state eseguite sulla base delle raccomandazioni fornite dall'AGI (1977).

Sempre in Figura 7-11, viene riportato il valore di CSR calcolato ed i corrispondenti valori di $N_{1(60)}$ da siti in cui sono stati osservati o meno gli effetti della liquefazione per eventi simili avvenuti in passato, con magnitudo 7.5. Le corrispondenti curve CRR sono state determinate all'interno del grafico in modo da separare chiaramente i dati corrispondenti all'avvenuta liquefazione da quelli per i quali non è stato osservato il fenomeno in esame.

Le curve sono valide per eventi simili di magnitudo pari a 7.5, per cui è necessario introdurre un fattore di scala (MSF) per adattare le curve di CRR alla magnitudo di riferimento per il caso in esame (5.7), come indicato in precedenza.

Si può osservare dalla Figura 7-11 come siano state sviluppate curve di resistenza ciclica per terreni aventi diverso contenuto di fini, a partire dalla curva di riferimento corrispondente alla sabbia pulita ($FC < 5\%$).

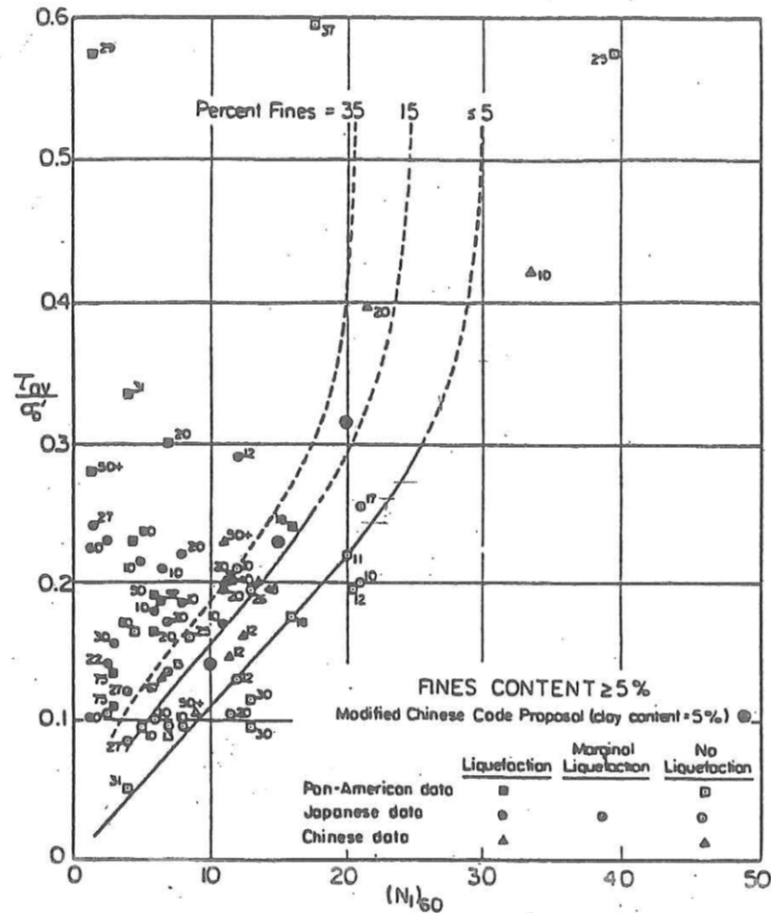


Figura 7-9: Relazione tra sforzo di taglio ciclico a liquefazione e $N_{1(60)}$ – sisma di riferimento Magnitudo = 7.5 (Seed et al., 1985).

La curva di riferimento per sabbie pulite è descritta dalla seguente equazione (Rauch, 1998, come riportato da Youd et al., 2001):

$$CRR_{7.5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N_1)_{60} + 45]^2} - \frac{1}{200}$$

L'equazione è valida per $N_{1(60)} < 30$. Nel caso in cui sia $N_{1(60)} \geq 30$, le sabbie pulite sono classificate come non liquefacibili, a causa della loro elevata densità.

L'equazione che segue (Idriss e Seed, come riportato da Youd et al. 2001) viene utilizzata per la correzione di valori di $N_{1(60)}$ ai valori corrispondenti per sabbia pulita $N_{1(60)cs}$:

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60}$$

In cui:



LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA

Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA

Relazione Geotecnica dell'intervento

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
IN0W	00	R 26 RG	CS 00 00 003	A	44 di 45

$$\alpha = 0 \text{ per } FC < 5\%$$

$$\alpha = \exp [1.76 - (190/FC^2)] \text{ per } 5\% < FC < 35\%$$

$$\alpha = 5 \text{ per } FC \geq 35\%$$

$$\beta = 1 \text{ per } FC < 5\%$$

$$\beta = [0.99 + (FC \cdot 1.5/1000)] \text{ per } 5\% < FC < 35\%$$

$$\beta = 1.2 \text{ per } FC \geq 35\%$$

La resistenza alla liquefazione aumenta meno che proporzionalmente al crescere della tensione di confinamento. Una rappresentazione di tale relazione è stata proposta da Hynes e Olsen (1999) e riportata da Youd et al. (2001), elaborata sulla base dei risultati di prove cicliche in laboratorio. In particolare, gli autori raccomandano di utilizzare il seguente coefficiente di correzione:

$$k_{\sigma} = \left(\frac{\sigma'_{v0}}{p_a} \right)^{(f-1)} \leq 1$$

dove:

σ'_{v0} = tensione verticale efficace

p_a = pressione atmosferica di riferimento

f = fattore che dipende dalla densità relative del materiale in sito.

In accordo a Youd et al. (2001) il fattore “f” si può stimare come segue, sia per sabbie pulite o limose e per ghiaie:

$$40\% < DR < 60\% \quad f = 0.7 \div 0.8$$

$$60\% < DR < 80\% \quad f = 0.6 \div 0.7$$

Pertanto, per ogni prova SPT dove non è disponibile il relativo contenuto di fini è stato ipotizzato conservativamente un valore di contenuto di fini minimo pari al 5% per i materiali sabbiosi-ghiaiosi, mentre per i terreni argillosi è stato ipotizzato un contenuto di fini pari al 60%.

In conclusione, in accordo a Youd et al. (2001) il fattore di sicurezza FL rispetto al fenomeno della liquefazione vale:

$$FL = (CRR_{7.5}/CSR) MSF k_{\sigma}$$

	LINEA AV/AC TORINO-VENEZIA Tratta MILANO-VERONA					
	Lotto funzionale QUADRUPPLICAMENTO EST IN USCITA DA BRESCIA					
Relazione Geotecnica dell'intervento	COMMESSA INOW	LOTTO 00	CODIFICA R 26 RG	DOCUMENTO CS 00 00 003	REV. A	FOGLIO 45 di 45

6.3. Risultati e considerazioni conclusive

La verifica alla liquefazione dei terreni presenti lungo il tracciato di progetto descritta ai paragrafi precedenti è stata condotta sul database delle prove SPT disponibili. I risultati sono riportati in dettaglio in Appendice A della relazione geologica. In particolare, i grafici per le prove SPT (Appendice A) riportano:

- Valori di SPT misurati a ciascuna profondità a partire dal piano campagna.
- Contenuto di fini misurato in laboratorio sui campioni prelevati (simbolo pieno), oppure contenuto di fini stimato sulla base dei risultati disponibili dalle altre prove, per lo stesso orizzonte di terreno.
- Valori di $N_{1(60)cs}$, ossia il numero di colpi/30cm corretto in funzione della tensione verticale in sito, in funzione dell'energia trasmessa in fase di esecuzione della prova e del contenuto di fini.
- Andamento con la profondità dello sforzo di taglio ciclico CSR, riferito alla magnitudo di riferimento per l'analisi ($M=5.5$) e i valori puntuali della resistenza allo sforzo di taglio sismico calcolati per tutti i valori di SPT che non siano stati esclusi dal calcolo di suscettibilità alla liquefazione perché classificati come non liquefacibili (si veda quanto detto al paragrafo precedente).
- Valore del fattore di sicurezza ottenuto come rapporto CRR/CSR per ogni dato. Si osserva a questo proposito che la verifica alla suscettibilità alla liquefazione deve tener conto del potenziale insorgere di deformazioni anche significative anche per valori di $FS > 1$ per cui si ritiene giustificato rappresentare la linea per $FS > 1.25$.

Sulla base dei risultati ottenuti, si osserva per tutte le verifiche condotte un fattore di sicurezza rispetto al pericolo di liquefazione superiore a 1.25. Di conseguenza, il sito di progetto insiste su terreni stabili rispetto al pericolo della liquefazione.