

COMMITTENTE:



PROGETTAZIONE:



**DIRETTRICE FERROVIARIA MESSINA – CATANIA – PALERMO**

**NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO-CATANIA**

**U.O. INFRASTRUTTURA SUD**

**PROGETTO DEFINITIVO**

**TRATTA DITTAINO - CATENANUOVA**

**GEOTECNICA**

**RELAZIONE TECNICA VALUTAZIONE RISCHIO LIQUEFAZIONE TRATTA DA KM 8+920 A KM 22+800**

SCALA:

-

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

RS3E 50 D 78 RH GE0006 007 A

Rev.	Descrizione	Redatto	Data	Verificato	Data	Approvato	Data	Autorizzato Data
A	Emissione esecutiva	S. Gasperoni	12/2019	Danisi	12/2019	F. Sparacino	12/2019	D. Tiberti 12/2019

ITALFERR S.p.A.  
Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane  
Direzione Messina  
UO Infrastruttura Sud  
Prof. Ing. Danilo Tiberti  
Circolo degli Ingegneri Prov. di Napoli n. 10178

## SOMMARIO

1	PREMESSA .....	3
2	NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
2.1	NORMATIVA DI RIFERIMENTO .....	4
2.2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO.....	4
3	CLASSIFICAZIONE SISMICA E STABILITA' DEL SITO.....	5
3.1	RISPOSTA SISMICA.....	5
3.1.1	<i>Categoria di sottosuolo</i> .....	6
3.1.2	<i>Azioni sismiche di progetto</i> .....	8
3.1.3	<i>Magnitudo</i> .....	10
4	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA .....	13
4.1	DEFINIZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE INTERCETTATE.....	13
4.2	SINTESI PARAMETRI GEOTECNICI DI PROGETTO .....	15
4.3	FALDA .....	19
5	LIQUEFAZIONE .....	20
5.1	GENERALE.....	20
5.2	METODOLOGIE DI ANALISI .....	22
5.3	ANALISI BASATE SU PROVE SPT .....	24
5.4	ANALISI BASATE SULLE ONDE DI TAGLIO VS.....	26
5.5	RISULTATI.....	27
5.5.1	<i>Prove SPT</i> .....	27
5.5.2	<i>Prove sismiche</i> .....	29
5.6	SINTESI RISULTATI.....	31



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO


Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 78 RH	GE0006 007	A	3 di 31

## 1 PREMESSA

Il presente documento illustra le valutazioni effettuate in merito alla suscettibilità alla liquefazione dei terreni di fondazione in relazione alla pericolosità sismica dei siti relativamente progetto definitivo relativo alla tratta a semplice binario Dittaino – Catenanuova del Nuovo Collegamento Palermo – Catania. L'intera tratta Dittaino – Catenanuova ha uno sviluppo complessivo di circa 22,8 km, le analisi si riferiscono alla tratta compresa tra il km 8+920 e il km 22+800.

In particolare nella presente relazione è affrontata la valutazione delle caratteristiche dei terreni con riferimento alla suscettibilità alla liquefazione e definizione dei coefficienti di sicurezza e del potenziale di liquefazione dei terreni a partire dalle azioni sismiche di progetto, tenendo conto anche della categoria di sottosuolo dei terreni interessati dalle opere e delle condizioni topografiche del tracciato.

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO 50	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0006 007	REV. A

## 2 NORMATIVA E DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

### 2.1 Normativa di riferimento


La presente relazione è stata redatta in conformità alla seguente normativa:

- Norme Tecniche per le Costruzioni - D.M. 14-01-08 (NTC-2008).
- Regolamento (UE) N.1299/2014 del 18 novembre 2014 della Commissione Europea. Relativo alle specifiche tecniche di interoperabilità per il sottosistema “infrastruttura” del sistema ferroviario dell’Unione Europea.
- Eurocodici EN 1991-2: 2003/AC:2010.
- RFI DTC SICS MA IFS 001 B del 22-12-17 - Manuale di Progettazione delle Opere Civili- sezione 3.
- RFI DTC SICS SP IFS 004 B del 22-12-17 – Capitolato generale tecnico di Appalto delle opere civili.

### 2.2 Documenti di riferimento

La presente relazione è stata redatta con riferimento ai seguenti documenti.

- D.1. RS3E50D69RGGE0001001A - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta PM Palomba-Catenanuova. Progetto Definitivo. Relazione geologica, geomorfologica ed idrogeologica.
- D.2. RS3E50D78F6GE0006001A ÷ RS3E50D78F6GE0006009A - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Catenanuova-Raddusa. Progetto Definitivo. Profilo longitudinale geotecnico da tav.7 a tav.15
- D.3. RS3E50D78RHGE0006001A - Nuovo collegamento Palermo-Catania tratta Catenanuova-Raddusa. Progetto Definitivo. Relazione geotecnica generale tratta da km 8+920 a km 22+800

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO 50	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0006 007	REV. A

### 3 CLASSIFICAZIONE SISMICA E STABILITA' DEL SITO.

#### 3.1 RISPOSTA SISMICA

L'azione sismica sulle costruzioni è valutata a partire da una "pericolosità sismica di base", in condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

I risultati dello studio di pericolosità sono forniti, in corrispondenza dei punti di un reticolo (reticolo di riferimento) i cui nodi sono sufficientemente vicini fra loro (non distano più di 10 km) e nelle condizioni di sito di riferimento rigido orizzontale:

- in termini di valori di accelerazione orizzontale massima  $a_g$ , del valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale  $F_0$ , del periodo di inizio del tratto costante dello spettro in accelerazione orizzontale  $T_c^*$ ;
- per diverse probabilità di superamento in 75 anni e/o diversi periodi di ritorno  $T_R$  ricadenti in un intervallo di riferimento compreso almeno tra 45 e 1462 anni, estremi inclusi.

Pertanto, per individuare, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche occorre fissare:

- la vita di riferimento  $V_R$  della costruzione;
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento  $P_{VR}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati.

Infatti, fissata la vita di riferimento  $V_R$ ,  $T_R$  è esprimibile in funzione di  $P_{VR}$  mediante l'espressione:


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

La vita di riferimento è calcolata come:

$$V_R = V_N \cdot C_U$$

dove  $V_N$  è la vita nominale dell'opera e  $C_U$  la classe d'uso.

Per le opere d'arte del presente progetto si ha in linea generale:  $V_N=75$  anni e  $C_U=1.5$  (classe d'uso III).

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO 50	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0006 007	REV. A

Fa eccezione il tratto dell'opera VI04 in corrispondenza dello scavalco dell'autostrada A19 Palermo-Catania (viabilità di tipo A e quindi strategica), si tratta della campata di scavalco dell'autostrada e delle due adiacenti, per cui si ha:  $V_N = 100$  anni e  $C_U = 2.0$  (classe d'uso IV).

Nota l'accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido ag, l'accelerazione di picco  $a_{max}$  è valutata sulla base della risposta sismica locale:

$$a_{max} = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

dove  $S_S$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione stratigrafica,  $S_T$  è il coefficiente che comprende l'effetto della amplificazione topografica. Nella relazione geologica sono riportati, per vari punti lungo il tracciato, i parametri sismici di riferimento.

Nel seguito viene definita la categoria di sottosuolo e le azioni sismiche di progetto.

### 3.1.1 Categoria di sottosuolo

La classificazione della categoria di sottosuolo viene eseguita sulla base di misure dirette dei valori di velocità di propagazione delle onde di taglio nei primi 30 m di profondità  $V_{s,eq}$ . Si può ricavare il parametro  $V_{s,eq}$  mediante la relazione:


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

Per la definizione della categoria di sottosuolo sismica, in accordo alla normativa vigente sono state eseguite indagini sismiche finalizzate alla determinazione della  $V_{s,eq}$ , in particolare sono state eseguite prove sismiche di tipo MASW (nella campagna geognostica del 2011), prove Down-Hole (campagna d'indagine II fase del 2015) e prove MASW in concomitanza dei viadotti in progetto (nella campagna geognostica del 2018); nella tabella seguente sono sintetizzati i risultati ( $V_{s,eq}$  e categoria sottosuolo). Come si osserva dalla tabella, lungo il tracciato, i valori delle velocità delle onde di taglio identificano terreni sia di tipo B, sia di tipo C, come confermato anche dalle prove SPT eseguite in sito.

Tabella 1 – Categoria sottosuolo

INDAGINE	$V_{s,eq}$ [m/s]	Categoria sottosuolo
B1	416	<b>B</b>
D9 - DH	318	<b>C</b>
D31 - DH	426	<b>B</b>
D33 - DH	414	<b>B</b>
S4 - MASW	403	<b>E</b>
S6 - MASW	321	<b>C</b>
S7 - MASW	447	<b>B</b>
S9 - MASW	367	<b>B</b>
S10 - MASW	282	<b>C</b>
MASW VI 01	308	<b>C</b>
MASW VI 02	339	<b>C (*)</b>
MASW VI 03	351	<b>C (*)</b>
MASW VI 04	287	<b>C</b>
MASW VI 05	361	<b>E</b>
MASW VI 06	353	<b>E</b>
MASW VI 07	260	<b>E</b>
MASW VI 08	481	<b>B</b>
MASW VI 09	306	<b>C</b>
MASW VI 10	506	<b>B</b>
MASW VI 11	445	<b>B (*)</b>
MASW VI 12	381	<b>C/B (*)</b>
(*) con importante inversione di velocità.		

Nelle relazioni di calcolo delle opere verrà definita per ogni singola opera la categoria di sottosuolo sulla base dell'indagine sismica più vicina. Per le opere con indagini sismiche che hanno evidenziato importanti inversioni delle velocità delle onde con la profondità, è stata appositamente analizzata la risposta sismica locale.

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO 50	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0006 007	REV. A

### 3.1.2 Azioni sismiche di progetto

Per il sito in esame, sulla base di quanto riportato nei capitoli precedenti, considerando il punto con l'accelerazione massima (avente coordinate longitudine 14.747 e latitudine 37.528, punto 47861 desunto dalla mappa di pericolosità sismica della relazione geologica)

si ha:

- per  $V_N=75$  anni,  $C_U=1.5$ , categoria di sottosuolo C: le accelerazioni massime attese al piano campagna sono pari a  $a_{max} = 0.285$  g.
- per  $V_N=100$  anni,  $C_U=2.0$ , categoria di sottosuolo C: le accelerazioni massime attese al piano campagna sono pari a  $a_{max} = 0.336$  g.

Tabella 2 – Localizzazione sito con ag massima

**FASE 1. INDIVIDUAZIONE DELLA PERICOLOSITÀ DEL SITO**

Ricerca per coordinate

LONGITUDINE:  LATITUDINE:

Ricerca per comune

REGIONE:  PROVINCIA:  COMUNE:

Elaborazioni grafiche

Grafici spettri di risposta

Variabilità dei parametri

Elaborazioni numeriche

Tabella parametri

Nodi del reticolo intorno al sito



Reticolo di riferimento


Controllo sul reticolo

Sito esterno al reticolo

Interpolazione su 3 nodi

Interpolazione corretta

Interpolazione:



La "Ricerca per comune" utilizza le coordinate ISTAT del comune per identificare il sito. Si sottolinea che all'interno del territorio comunale le azioni sismiche possono essere significativamente diverse da quelle così individuate e si consiglia, quindi, la "Ricerca per coordinate".

INTRO
FASE 1
FASE 2
FASE 3



$V_N=75$  anni,  $C_U=1.5$ , categoria di sottosuolo C

STATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C$ [s]
SLO	68	0.060	2.615	0.291
SLD	113	0.077	2.482	0.320
SLV	1068	0.204	2.455	0.515
SLC	2193	0.271	2.544	0.542

#### Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
$a_g$	0.204 g
$F_o$	2.455
$T_C$	0.515 s
$S_S$	1.399
$C_C$	1.307
$S_T$	1.000
q	2.400

#### Parametri dipendenti

S	1.399
$\eta$	0.417
$T_B$	0.224 s
$T_C$	0.673 s
$T_D$	2.416 s

$V_N=100$  anni,  $C_U=2.0$ , categoria di sottosuolo C

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	120	0.078	2.498	0.323
SLD	201	0.093	2.658	0.340
SLV	1898	0.256	2.526	0.537
SLC	2475	0.285	2.560	0.547

### Parametri indipendenti

STATO LIMITE	SLV
$a_g$	0.256 g
$F_o$	2.526
$T_C^*$	0.537 s
$S_s$	1.312
$C_c$	1.289
$S_T$	1.000
$q$	2.400

### Parametri dipendenti

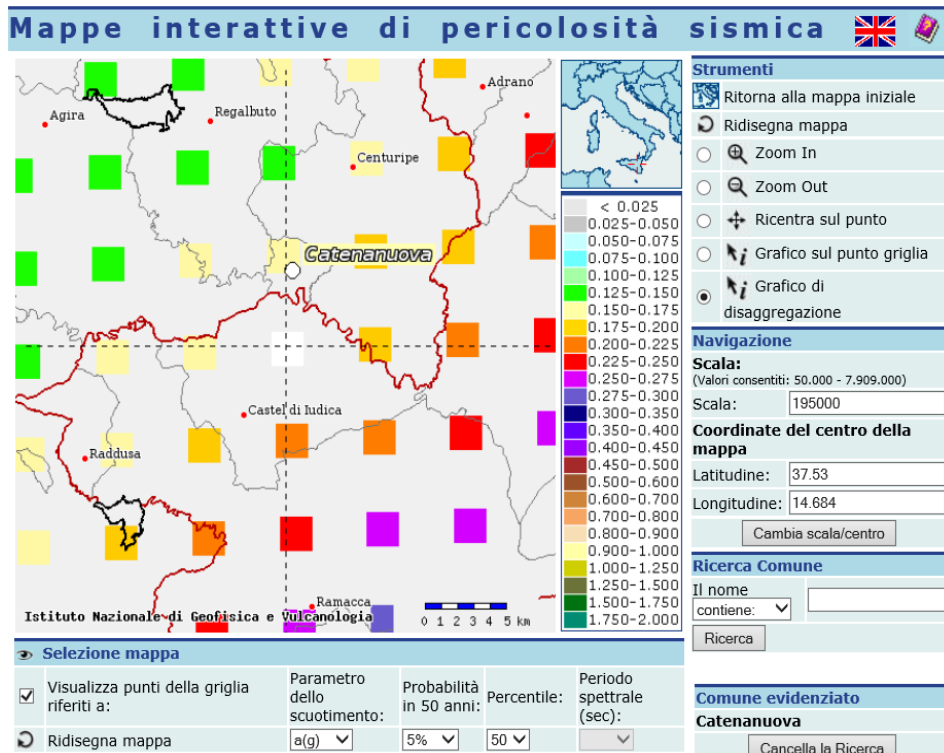
$S$	1.312
$\eta$	0.417
$T_B$	0.231 s
$T_C$	0.692 s
$T_D$	2.625 s

### 3.1.3 Magnitudo

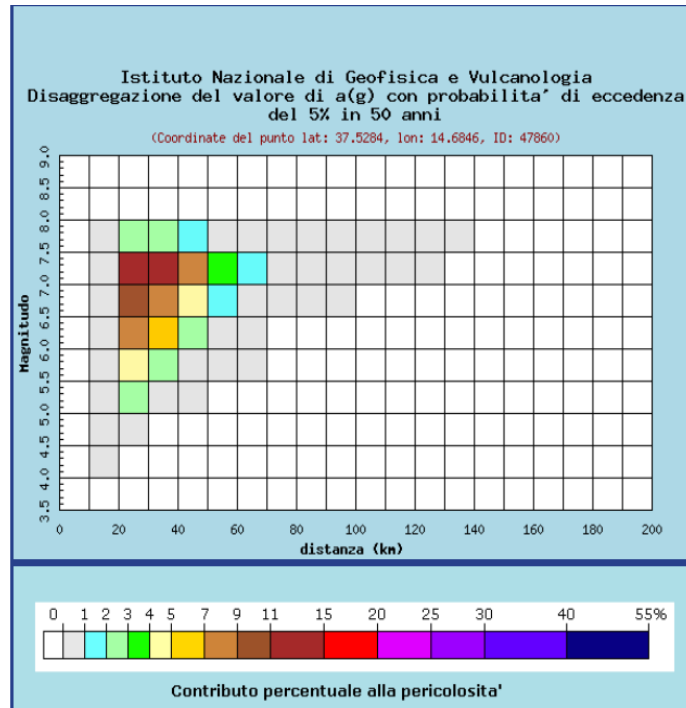
La magnitudo di riferimento per il sito viene presa dai grafici di disaggregazione del sito INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, "esse1-gis.mi.ingv.it").

Cautelativamente, si è considerato un unico valore di magnitudo per tutto il tracciato, assunto analizzando il punto con l'accelerazione massima (vedasi paragrafo precedente) e considerando una magnitudo media (vedasi tabelle a seguire). E' stato, pertanto, assunto come valore di progetto una magnitudo pari a  $M = 6.8$ .

**Tabella 3 – Mappa di pericolosità sismica**



**Tabella 4 – Magnitudo e distanza**



Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 5% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 37.5284, lon: 14.6846, ID: 47860)									
	Magnitudo									
	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0	7,0-7,5	7,5-8,0	8,0-8,5
0-10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.001	0.062	0.107	0.154	0.215	0.236	0.208	0.035	0.000
20-30	0.000	0.000	0.473	2.240	4.760	8.210	10.700	11.100	2.070	0.000
30-40	0.000	0.000	0.000	0.249	2.390	5.290	8.790	11.400	2.390	0.000
40-50	0.000	0.000	0.000	0.017	0.743	2.220	4.810	7.600	1.770	0.000
50-60	0.000	0.000	0.000	0.000	0.073	0.493	1.840	3.580	0.915	0.000
60-70	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.046	0.691	1.780	0.499	0.000
70-80	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.190	0.797	0.245	0.000
80-90	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.240	0.085	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.095	0.044	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.043	0.030	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.014	0.017	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.005	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
6,800	35,400	1,470

## 4 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La successione stratigrafica è stata desunta sulla base delle indagini eseguite e dai rilievi e studi geologico-geomorfologici. Per la scelta dei parametri geotecnici di progetto delle unità intercettate, ci si è basati sui risultati delle indagini eseguite per la linea in progetto.

Nel seguito vengono definite le unità geotecniche intercettate; nel profilo stratigrafico longitudinale sono mostrati i risultati di tutte le indagini eseguite e sarà utilizzato per la definizione della successione stratigrafica in corrispondenza delle singole opere in progetto e della linea in generale.

### 4.1 Definizione delle unità geotecniche intercettate

Sulla base dei risultati delle indagini (in sito ed in laboratorio) delle campagne geognostiche, si perviene ad una caratterizzazione geotecnica dei terreni e quindi alla definizione della stratigrafia e dei parametri geotecnici di progetto.

Unità geotecniche:

- **Unità R – Ripporto antropico e coltre vegetale:** si tratta del terreno intercettato a partire da p.c.; si distinguono la coltre vegetale (unità Rv) costituita prevalentemente da limo sabbioso argilloso con resti vegetali ed il terreno di riporto antropico (unità Ra) costituito da sabbia con ghiaia, laterizi, cls.
- **Unità b2 – Depositi eluvio-colluviali:** si tratta di limo argilloso sabbioso a struttura caotica o indistinta con abbondanti resti vegetali e frequenti ghiaie e ciottoli.
- **Unità ba – Depositi alluvionali attuali:** si tratta di terreni rinvenibili in corrispondenza degli alvei dei corsi d'acqua (fiumi e valloni) e sono prevalentemente costituiti da limi, limi sabbiosi e ghiaie.
- **Unità bb – Depositi alluvionali recenti:** questi depositi affiorano lungo quasi tutto il tracciato sotto il riporto; si distinguono terreni prettamente coesivi limoso argillosi, talvolta debolmente sabbiosi (**unità bbc**) e terreni incoerenti sabbioso ghiaiosi con locali trovanti (**unità bbi**).
- **Unità bn – Depositi alluvionali terrazzati:** si rinvengono sia la facies più coesiva dei depositi alluvionali terrazzati che quella più incoerente. La frazione coesiva (**unità bnc**) è costituita da argille limose e limi argillosi di colore bruno e nocciola, con locali passaggi sabbioso-limosi grigiastri, rare ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate e locali livelli di torbe e terreni organici nerastri. La porzioni più incoerenti di tale unità (**unità bni**), a comportamento essenzialmente granulare, è formata da ghiaie poligeniche ed eterometriche, da sub-angolose ad arrotondate, talora con blocchi angolosi, con matrice sabbiosa e sabbioso-limosa di colore grigio e giallastro, da scarsa ad abbondante. Si rinvengono inoltre sabbie, sabbie

limose e limi sabbiosi di colore grigio e giallastro, a struttura indistinta o laminata, con locali ghiaie poligeniche da sub-angolose ad arrotondate e rari blocchi angolosi.

- **Unità FYN – Argilla limosa, marnosa grigia (Flysch Numidico):** è costituita da argille marnose e argille limose a struttura scagliosa di colore grigio generalmente molto consistenti con frequenti livelli di sabbie limose e intercalazioni di quarzoareniti.
- **Unità AAC – Argilla limosa marnosa grigia (Argille e Arenarie Glauconitiche di Catenanuova):** è rappresentata da argille limose e argille marnose di colore grigio e grigio-verdastro a struttura scagliosa, con talvolta livelli di sabbie limose grigie, livelli argillitici duri e locali intercalazioni di arenarie medio-fini grigie e giallastre, in strati da sottili a medi.
- **Unità TRV/TRVa – Formazione di Terravecchia:** la litofacies argilloso marnosa (**unità TRV**) è costituita da argille marnose e marne argillose di colore grigio, grigio-azzurro e grigio-verdastro, a struttura scagliosa o sottilmente stratificata, con frequenti livelli di sabbie limose, con livelli argillitici e argillitico marnosi e locali lenti di conglomerati poligenici. La litofacies argilloso-brecciata (**unità TRVa**), è costituita da argille, argille limose e limi argillosi a struttura o a blocchetti poliedrici, talora scagliosa o indistinta, con locali livelli di sabbie limose grigie e frequenti ghiaie poligeniche da angolose a sub-angolose; a luoghi si rinvengono passaggi di argille marnose e argilliti di colore grigio-verdastro e livelli litoidi arenacei.
- **Unità GTL - Formazione di Cattolica:** si tratta prevalentemente di depositi lagunari e di bacino evaporitico, costituiti da tre differenti litofacies a composizione gessoso-argillosa (**GTL1**), calcareo-gessosa (**GTL2**) e argilloso-brecciata (**GTLa**).

## 4.2 Sintesi parametri geotecnici di progetto

Nel seguito si sintetizzano le caratteristiche geotecniche di progetto per le varie unità geotecniche.

### Unità b2 – Depositi eluvio-colluviali

$\gamma = 19.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 25 \div 30^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 50 \div 150 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$k = 5 \cdot 10^{-7} \div 4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$E_o = 250 \div 350 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità ba – Depositi alluvionali attuali

$\gamma = 18.5 \div 19.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \div 5 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 24 \div 32^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$k = 10^{-6} \div 10^{-4} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$E_o = 100 \div 340 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità bbc – Depositi alluvionali recenti coesivi (limoso argillosi)

$\gamma = 19.0 \div 20.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \div 10 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 19 \div 25^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 40 \div 250 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$k = 5 \cdot 10^{-8} \div 4 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$G_o = 25 \div 150 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 70 \div 350 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità bbi – Depositi alluvionali recenti incoerenti (sabbia, sabbia con ghiaia, sabbia ghiaiosa)

$\gamma = 19.5 \div 20.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 34 \div 39^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$V_s = 200 \div 400 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 80 \div 300 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 200 \div 800 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale
$k = 1 \cdot 10^{-5} \div 1 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità

### Unità bnc – Depositi terrazzati coesivi limoso argillosi

$\gamma = 19.0 \div 20.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 5 \div 12 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 23 \div 25^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 50 \div 400 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$k = 6.5 \cdot 10^{-8} \div 1.5 \cdot 10^{-6} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$V_s = 160 \div 190 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 50 \div 70 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 130 \div 180 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale

### Unità bni – Depositi terrazzati ghiaioso sabbiosi

$\gamma = 19.0 \div 20.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 35 \div 38^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$k = 1.5 \cdot 10^{-6} \div 5 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$V_s = 200 \div 450 \text{ m/s}$	velocità delle onde di taglio
$G_o = 80 \div 300 \text{ MPa}$	modulo di deformazione a taglio iniziale
$E_o = 200 \div 800 \text{ MPa}$	modulo di deformazione elastico iniziale





NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 78 RH	GE0006 007	A	17 di 31

#### Unità TRV/TRVa – Formazione di Terravecchia / Unità GTLa – Formazione di Cattolica

$\gamma = 19.5 \div 21.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 5 \div 25 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 19 \div 25^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 74 \div 350 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$k = 5 \cdot 10^{-9} \div 7 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$E_o = 200 \div 900 \text{ MPa}$	Modulo di deformazione elastico iniziale

#### Unità AAC – Argille marnose grigie di Catenanuova

$\gamma = 19.5 \div 20.5 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 5 \div 25 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 19 \div 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 100 \div 350 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$k = 5 \cdot 10^{-9} \div 2 \cdot 10^{-7} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$E_o = 200 \div 900 \text{ MPa}$	Modulo di deformazione elastico iniziale

#### Unità FYN – Argille limosa, marnosa (Flysch Numidico)

$\gamma = 20.0 \div 21.0 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 5 \div 20 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\phi' = 20 \div 24^\circ$	angolo di resistenza al taglio
$c_u = 50 \div 350 \text{ kPa}$	resistenza al taglio in condizioni non drenate
$k = 5 \cdot 10^{-9} \div 5 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$	coefficiente di permeabilità
$E_o = 300 \div 900 \text{ MPa}$	Modulo di deformazione elastico iniziale

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



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 78 RH	GE0006 007	A	18 di 31

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

I valori delle proprietà geotecniche indicate sono da intendersi come range di valori guida per la progettazione; resta inteso che nelle analisi geotecniche di dettaglio delle varie opere andranno calibrati sulla base delle condizioni geotecniche locali, delle specifiche situazioni locali, oltre che rapportati alla tipologia di opere (fondazioni pali o opere di sostegno) ed alle ipotesi di calcolo assunte.



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 78 RH	GE0006 007	A	19 di 31

### 4.3 Falda

Nel tracciato in progetto sono stati installati piezometri nelle diverse campagne d'indagine.

Più in dettaglio il periodo di monitoraggio dei piezometri relativi alle prime due campagne di indagine (2013 e 2015) è iniziato da novembre 2014 e terminato a dicembre 2015. Alcuni di questi strumenti sono stati monitorati anche a novembre 2018. Gli strumenti installati nella campagna di indagine del 2018 sono stati monitorati da luglio a novembre 2018.

Nella relazione geotecnica generale, a cui si rimanda, sono riportate tutte le letture piezometriche eseguite e nel profilo stratigrafico longitudinale è rappresentato il livello massimo di falda rilevato dai piezometri.

Lungo il tracciato il livello di falda è piuttosto variabile da 1 e 10 m di profondità dal p.c. in relazione all'andamento della morfologia locale, della presenza di fiumi, fossi, ecc.. La falda generalmente si colloca entro le alluvioni o comunque al passaggio di strato tra le alluvioni ed il substrato argilloso di base.

Per le analisi di liquefazione si è fatto riferimento al valore massimo di falda da letture piezometriche, come riportato nel profilo stratigrafico longitudinale.

## 5 LIQUEFAZIONE

### 5.1 Generale

Allo scopo di accertare la stabilità nei confronti della liquefazione, per il sito in esame sono state effettuate delle verifiche che hanno consentito di determinare il potenziale di liquefazione, parametro indicativo dell'estensione che il fenomeno può avere nei terreni.

La liquefazione è infatti un fenomeno per cui durante un sisma la rigidità e la resistenza del terreno possono ridursi significativamente. Ad essa sono associati la perdita di resistenza al taglio o l'accumulo di deformazioni plastiche che avvengono in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, a causa delle azioni cicliche e dinamiche che si verificano in condizioni non drenate. Tali fenomeni sono legati allo sviluppo di sovrappressioni interstiziali che, se positive, causano una diminuzione della tensione media efficace nel terreno e una riduzione della resistenza al taglio. Questa riduzione può essere una condizione temporanea o può indurre una condizione di collasso definitiva. Il fenomeno della liquefazione è profondamente influenzato dal numero dei cicli  $N$  del terremoto, dalla densità relativa  $D_r$  e dalla granulometria del terreno. Un terreno incoerente, a parità di altri fattori, è maggiormente esposto al pericolo della liquefazione quanto minore è la sua densità relativa. Il potenziale di liquefazione aumenta poi, ovviamente, al crescere di  $N$  (cicli del terremoto).

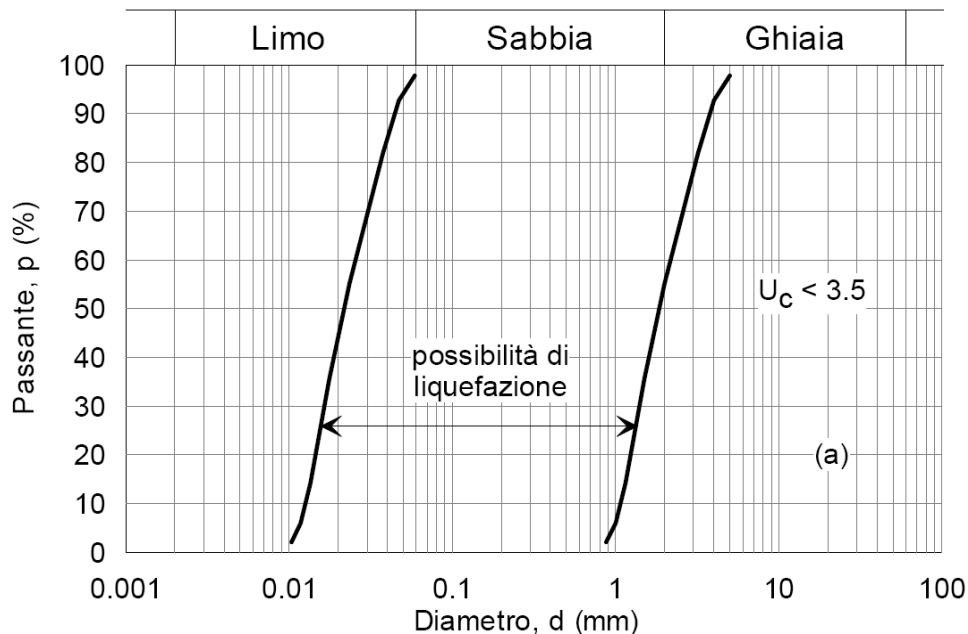
Il raggiungimento della condizione di liquefazione può dare origine ad effetti di varia natura, quali, nei casi più eclatanti:

- affondamento di edifici nel terreno;
- scorrimento di pendii;
- collasso di terrapieni, rilevati stradali e opere di terra in genere;
- collasso di palificate per perdita di connessione laterale;
- zampillio di copiosi getti d'acqua e di sabbia con formazione dei caratteristici coni eruttivi;
- collasso di opere di sostegno per sovrappinta del terreno a monte.

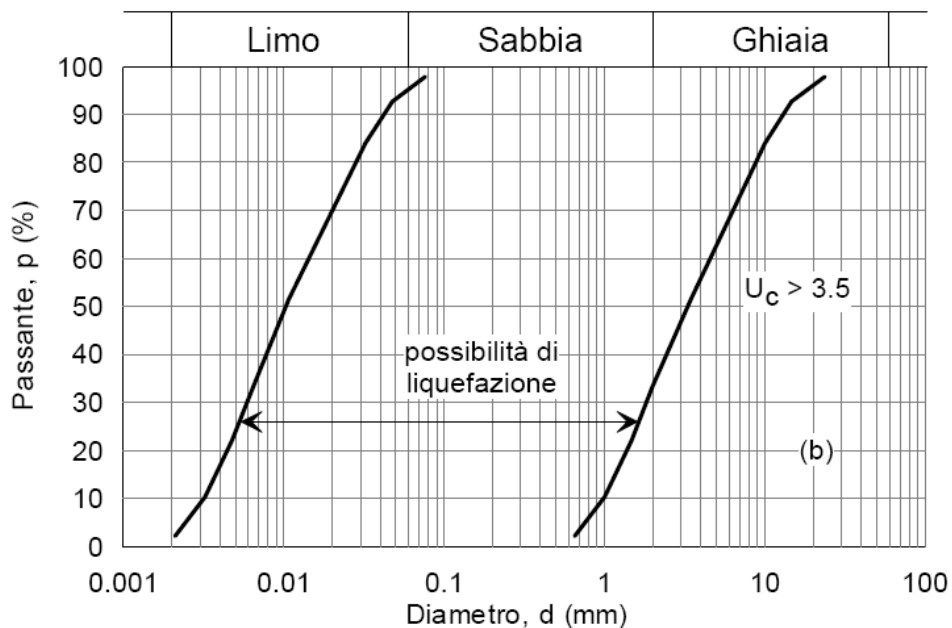
In questo contesto, il problema principale che si pone in fase di progettazione è la suscettibilità alla liquefazione quando la falda freatica si trova in prossimità della superficie ed il terreno di fondazione comprende strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limoso-argillosa. In altre parole, è necessario valutare il potenziale di liquefazione del terreno ove devono essere realizzate le opere in progetto.

Le NTC08 al paragrafo 7.11.3.4.2 affermano che la verifica alla liquefazione può essere omessa quando si manifesti una delle seguenti circostanze:

1. eventi sismici attesi di magnitudo  $M$  inferiore a 5;
2. Accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di free-field-campo libero) minori di 0.1 g;
3. Profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. Depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60} > 30$  oppure  $q_{c1N} > 180$  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  $q_{c1N}$  è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione verticale efficace di 100 kPa;
5. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate in Figura 1 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  ed in Figura 2 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ .



**Figura 1. Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c < 3.5$**



**Figura 2. Fusi granulometrici di terreni suscettibili alla liquefazione per  $U_c > 3.5$**

Per il sito in esame, sulla base di quanto riportato nei capitoli precedenti e nella Relazioni Geotecnica e Geologica, risulta che:

- le accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di free-field sono maggiori di 0.1 g;
- la profondità della falda è tipicamente compresa tra 1 m e 10 m da piano campagna;
- sono presenti singolari, locali livelli di strati sabbiosi e/o limo-sabbiosi di bassa plasticità con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} < 30$  relativi alle unità geotecniche alluvionali.

Pertanto si procede ad eseguire le idonee verifiche al fine di verificare la suscettibilità a liquefazione del sito.

## 5.2 Metodologie di analisi

La suscettibilità dei terreni nei confronti della liquefazione è stata valutata alle profondità in cui sono presenti i terreni potenzialmente liquefacibili, mediante un'analisi pseudostatica in condizioni di free-field, in corrispondenza di un numero adeguato di verticali significative.

La suscettibilità alla liquefazione è stata valutata ricavando il fattore di sicurezza FL nei confronti della liquefazione dato dal rapporto tra la resistenza disponibile alla liquefazione (stato di sforzo critico associato alla condizione di liquefazione) e la sollecitazione indotta dall'azione sismica.

Si definisce il rapporto di resistenza ciclica CRR, ovvero il parametro tensionale normalizzato rispetto alla tensione verticale efficace agente alla profondità esaminata, mentre CSR è il rapporto di tensione ciclica:

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

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

Il termine CSR può essere valutato ad una determinata profondità nel sottosuolo attraverso la seguente relazione semplificata di Seed e Idriss (1971):

$$CSR = \frac{\tau_{media}}{\sigma'_{v0}} = 0.65 \frac{a_{max,s}}{g} \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} r_d$$

dove:


- $a_{max,s}$  è l'accelerazione orizzontale di picco a piano campagna del terremoto atteso;
- $g$  è l'accelerazione di gravità;
- $\sigma_v$  e  $\sigma'_v$  sono rispettivamente la tensione totale verticale e la tensione efficace verticale alla profondità considerata;
- $r_d$  è un coefficiente riduttivo dell'azione sismica che tiene conto della deformabilità del sottosuolo.

Il coefficiente dell'azione sismica  $r_d$  si può ricavare, per profondità dal piano campagna non superiori a 20 m, mediante la seguente espressione di Idriss e Boulanger (2004):

$$r_d = \exp \left[ \left( -1.012 - 1.126 \sin \left( \frac{z}{11.73} + 5.133 \right) \right) + \left( 0.106 + 0.118 \sin \left( \frac{z}{11.28} + 5.142 \right) \right) M \right]$$

dove:

- $z$  è la profondità dal piano campagna;
- $M$  magnitudo di momento dell'evento sismico atteso.

	NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA PROGETTO DEFINITIVO					
	Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione	COMMESSA <b>RS3E</b>	LOTTO 50	CODIFICA D 78 RH	DOCUMENTO GE0006 007	REV. A

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

I metodi per la valutazione del rapporto di resistenza ciclica a partire dai risultati di prove in sito sono applicabili nel caso di piano campagna sub-orizzontale e stati tensionali efficaci ridotti. Tuttavia, anche in assenza di tali condizioni, è possibile ottenere una stima approssimata del termine CRR attraverso l'introduzione di opportuni fattori correttivi.

Dato che CRR dipende dal numero di cicli significativi, che a sua volta dipende dalla magnitudo  $M$ , è necessario rivalutare CRR per ricondurlo ad un valore costante di  $M$ , convenzionalmente preso come  $M = 6.53$ , introducendo un fattore di scala della magnitudo MSF così definito:

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

Il valore di MSF si può ricavare dalla relazione di Idriss e Boulanger (2004):

$$\left\{ \begin{array}{l} MSF = 6.9 \exp\left(\frac{-M}{4}\right) - 0.058 \\ MSF \leq 1.8 \end{array} \right.$$

### 5.3 Analisi basate su prove SPT

Avendo a disposizione i risultati delle prove SPT, si è proceduto nel seguente modo:

1. il numero di colpi  $N_{SPT}$  è stato ricondotto ad un valore normalizzato e corretto  $(N_1)_{60}$  mediante la seguente relazione:

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

2. il coefficiente  $C_N$ , che tiene conto dell'influenza della pressione verticale efficace, è stato ricavato per via iterativa dalla relazione di Boulanger e Idriss (2004):

$$C_N = \left( \frac{p_a}{\sigma'_v} \right)^{0.784 - 0.0768\sqrt{(N_1)_{60}}}$$

dove  $p_a$  è la pressione atmosferica (100 kPa). Tale coefficiente non deve comunque superare il valore di 1.7.



3. il fattore  $C_E$  è un fattore 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 maglio 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.

4. 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).
5. il valore della resistenza penetrometrica normalizzata  $(N_1)_{60}$  è stato riportato ad un valore equivalente per le sabbie pulite attraverso la relazione di Idriss e Boulanger (2004):

$$(N_1)_{60CS} = (N_1)_{60} + \exp\left(1.63 + \frac{9.7}{FC} - \left(\frac{15.7}{FC}\right)^2\right)$$

dove FC è la frazione di fine espressa in percentuale.

Il contenuto di materiali fini (FC) è stato assunto dalle analisi granulometriche eseguite sul campione prelevato in corrispondenza della quota SPT o comunque entro lo strato analizzato; per i valori relativi ai sondaggi del 2011, per i quali non è disponibile il laboratorio, è stato preso un valore di 20% (valore medio da prove granulometriche dell'unità in esame).

6. dal valore di  $(N_1)_{60}$  può essere ricavato il valore di resistenza alla liquefazione CRR mediante l'impiego di abachi di letteratura ottenuti dall'osservazione di casi storici, in cui sono rappresentate le curve limite che separano le zone di possibile liquefazione da quelle di non liquefazione. Tali curve possono essere ottenute tramite la seguente relazione in funzione della frazione fine FC:

$$CRR = \exp\left[\frac{(N_1)_{60CS}}{14.1} + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{126}\right)^2 - \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{23.6}\right)^3 + \left(\frac{(N_1)_{60CS}}{25.4}\right)^4 - 2.8\right]$$

Quindi, utilizzando l'espressione sopra riportata, è stato ricavato il valore di CRR.

7. La sicurezza nei confronti della liquefazione è stata valutata, alla profondità considerata, mediante il coefficiente di sicurezza FL.

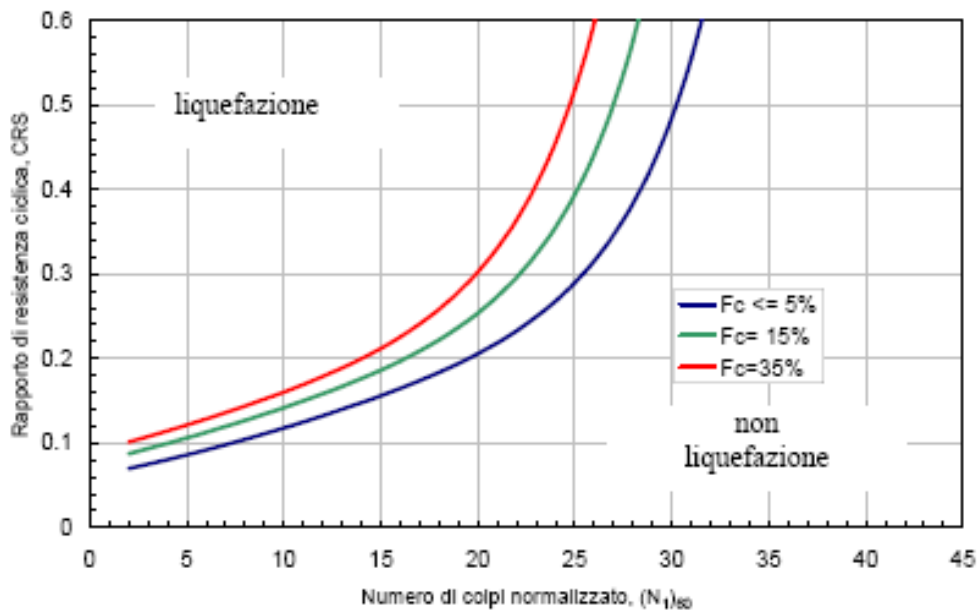


Figura 3. Curve per il calcolo del rapporto di resistenza ciclica CRR dai risultati di prove SPT

#### 5.4 Analisi basate sulle onde di taglio VS

L'utilizzo delle velocità delle onde di taglio  $V_s$  per valutare la resistenza alla liquefazione è ugualmente valido perché sia la velocità  $V_s$ , sia la resistenza alla liquefazione CRR, sono similmente influenzate dagli stessi fattori (rapporto dei vuoti, stato di sforzo, storia dello sforzo, età geologica, ecc.).

Disponendo delle misure di  $V_s$  effettuate con prove Down Hole, si è proceduto nel seguente modo:

1. La velocità  $V_s$  è corretta dalla sovrappressione usando l'equazione (Scora, 1987; Kayen et al., 1992; Robertson et al., 1992):

$$V_{s1} = V_s \cdot \left( \frac{P_a}{\sigma_{v0}} \right)^{0.25}$$

dove

- $V_{s1}$  = velocità delle onde di taglio corretta della sovrappressione;

- $V_s$  = velocità delle onde di taglio misurate in situ da prova;
- $P_a$  = pressione atmosferica approssimativamente pari a 100 kPa;
- $\sigma'_{v0}$  = pressione effettiva iniziale alla stessa unità di misura di  $P_a$ .

2. da  $V_{sI}$  può essere ricavato il valore di resistenza alla liquefazione  $CRR$  mediante la seguente equazione (Andrus e Stokoe, 1997):

$$CRR = \left[ a \cdot \left( \frac{V_{sI}}{100} \right)^2 + b \cdot \left( \frac{1}{V_{sI}^* - V_{sI}} - \frac{1}{V_{sI}^*} \right) \right]$$

dove

- $V_{sI}^*$  = limite superiore critico del valore della velocità delle onde di taglio necessario per la liquefazione
- $a$  e  $b$  = valori usati per tracciare le curve pari rispettivamente a 0.022 e 2.8;
- $V_{sI}$  = velocità delle onde di taglio corretta della sovrappressione.

I valori di  $V_{sI}^*$  variano linearmente da 200 m/s per suoli con contenuto di fini pari al 35% a 215 m/s per suoli con contenuto di fini del 5% o meno. Il valore di  $V_{sI}^*$  è ottenuto dalla seguente formula:

$$V_{sI}^* = 215 - 0.5(FC - 5)$$

dove

$FC$  = contenuto di fini in percentuale.

Il minimo valore di  $CRR$  è uguale a 0.033 per  $V_{sI} = 100$  m/s.

## 5.5 Risultati

### 5.5.1 Prove SPT

L'analisi di pericolosità alla liquefazione per l'area in esame è stata eseguita esaminando tutte le verticali disponibili, alle profondità in cui sono presenti i materiali potenzialmente liquefacibili: sabbie fini, sabbie limose (generalmente appartenenti all'unità alluvionale recente sabbiosa bbis). Nella tabella seguente si riassumono i risultati dell'analisi, limitatamente alle verticali ed alle profondità in cui sono stati evidenziati strati/livelli di materiale potenzialmente liquefacibile: l'equazione descritta al punto 6 è valida per valori di  $(N1)_{60cs} < 30$ , posti sotto falda. La verifica non è applicabile per terreni sopra falda. Dall'analisi sono stati esclusi i terreni descritti come limo-argillosi (descrizione verificata sia da certificato stratigrafico, sia da prove di laboratorio, ove



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 78 RH	GE0006 007	A	28 di 31

disponibili, sia da valori di Pocket Penetrometer), nell'ipotesi che tali terreni siano sufficientemente plastici e/o con un contenuto d'acqua inferiore a 85% del limite liquido, così da risultare non suscettibili di liquefazione.

In linea generale dalle indagini eseguite, non sono stati evidenziati valori di  $N_{SPT}$  particolarmente bassi, associati a strati sabbiosi fini sotto falda, che potessero indurre il sospetto di problematiche di liquefazione. Infatti, lungo il tracciato in esame, generalmente, si rinvenivano terreni coesivi argilloso limosi (unità bbc) oppure terreni sabbioso ghiaiosi limosi (unità bbi) comunque da moderatamente a ben addensati.

Gli unici valori di prova SPT su cui è stata eseguita la verifica sono:

- sondaggio S5 del Progetto Preliminare. Il valore di S5 appartiene ad uno strato di sabbia fine limosa con poca ghiaia tra 3.7 e 5.5 m da p.c.; anche se dalla foto della documentazione stratigrafica pare prevalga la componente coesiva. Nello strato è stato prelevato un campione ma non sono state fatte prove di laboratorio.
- sondaggio D18. Il valore di D18 è relativo ad uno strato di sabbia limosa con livelletti argillosi tra 7 e 7.5 m, anche se dalla foto della documentazione stratigrafica pare prevalga la componente coesiva. Nello strato è stato prelevato un campione ma non sono state fatte prove di laboratorio.
- sondaggi campagna geognostica del 2018: valori di  $N_{spt}$  in corrispondenza di sottili lenti di sabbie limose e limi sabbiosi allivionali sotto falda.

Per ciascun valore di prova SPT analizzato, è stata inserita la granulometria del campione, dove presente, se non c'era una misura diretta è stato assunto il valore medio del contenuto di fine (25% per unità bbi).

Quindi la verifica è stata eseguita per questi valori singolari con  $N_{SPT}$  bassi, su cui talvolta non si hanno informazioni complete (mancano le analisi granulometriche) e ci si è basati anche sulla descrizione stratigrafica del materiale, sulla documentazione fotografica, su eventuali prove PP eseguite e/o prove di permeabilità per meglio definire la tipologia di materiale (coesivo/incoerente sciolto). Comunque già dall'osservazione della documentazione fotografica, il terreno, in tutti i casi, non appare sciolto, ma la carota è compatta, ad evidenza che il contenuto di fine è rilevante.

Nella seguente figura e tabella sono mostrati i risultati della verifica. Da cui si può concludere che nel sito in esame, si escludono problematiche di liquefazione dei terreni.

Tabella 5. Sintesi delle analisi di liquefazione da prove SPT

Sond.	wl	$\gamma$	z	Nspt	FC	$\sigma_v$	u	$\sigma'_v$	C <sub>N</sub>	Er <sub>m</sub>	C <sub>E</sub>	C <sub>B</sub>	C <sub>R</sub>	C <sub>S</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	(N <sub>1</sub> ) <sub>60,CS</sub>	CRR	rd	CSR	(CSR) <sub>M</sub>	FSL
[m]	[kN/m <sup>3</sup> ]	[m]	[-]	[%]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
S5	3.4	19.0	5.0	15	25	95	16	79	1.14	60	1.0	1.0	1.0	1.0	17.1	22.2	2.36E-01	0.94	0.21	0.17	1.22
D18	5.2	19.0	7.0	16	18	133	19	115	0.92	60	1.0	1.0	1.0	1.0	14.7	18.8	1.92E-01	0.91	0.19	0.16	1.19
5_S7vi	6.5	19.0	10.5	17	25	200	40	160	0.74	60	1.0	1.0	1.0	1.0	12.6	17.7	1.80E-01	0.84	0.19	0.16	1.11
5_S9vi	8.0	19.0	7.5	29	12	143	0	143	0.80	60	1.0	1.0	1.0	1.0	23.2	25.3	2.96E-01	0.90	0.17	0.14	2.15
5_S10vi	9.0	19.0	10.5	12	25	200	15	185	0.67	60	1.0	1.0	1.0	1.0	8.0	13.1	1.41E-01	0.84	0.17	0.14	1.10
5_S15vi	5.3	19.0	7.5	16	25	143	22	121	0.89	60	1.0	1.0	1.0	1.0	14.3	19.3	1.98E-01	0.90	0.20	0.16	1.21
5_S01	2.0	19.0	7.5	28	25	143	55	88	1.08	60	1.0	1.0	1.0	1.0	30.2	35.3	1.18E+00	0.90	0.27	0.23	5.24
5_S14vi	7.5	19.0	7.5	23	25	143	0	143	0.80	60	1.0	1.0	1.0	1.0	18.4	23.5	2.58E-01	0.90	0.17	0.14	1.87

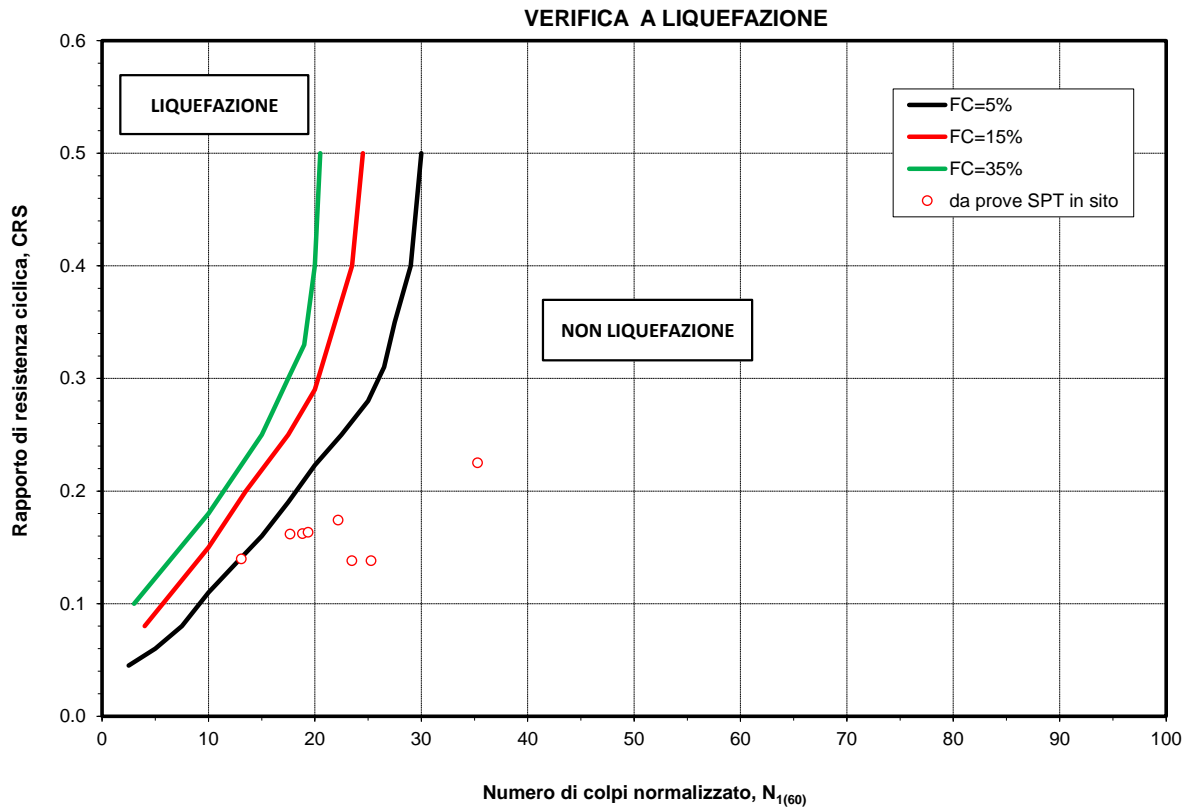


Figura 4 – verifica a liquefazione

### 5.5.2 Prove sismiche

Lungo lo sviluppo del tracciato, sono disponibili i risultati di tre prove Down-Hole su cui cautelativamente è stata eseguita la verifica di liquefazione, anche se i livelli incoerenti intercettati dai sondaggi sono di ridotto spessore e comunque prevalentemente grossolani. Ovviamente l'analisi è stata condotta per gli strati sotto falda.

<b>D9-DH</b>																	
$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.94													a=	0.022		
v	0.30													b=	2.8		
falda	7													M=	6.8	amax=	0.285
gn	19													MSF=	1.29		
<b>z</b>	<b>Vs</b>	<b><math>\sigma_v</math></b>	<b>u</b>	<b><math>\sigma'_v</math></b>	<b>cv</b>	<b>Vs1</b>	<b>FC</b>	<b>Vs1*</b>	<b>CRR,7.5</b>	<b>rd</b>	<b>CRS</b>	<b>CRS,M</b>	<b>FSL</b>				
m da p.c.	m/s	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[m/s]	[%]	[m/s]									
1	188	19	0	19													
3	188	57	0	57	1.2	216.4	22	206.5									
3	247	57	0	57	1.2	284.3	22	206.5									
8	247	152	10	142	0.9	226.3	22	206.5	NO LIQUEF	0.94	0.186	0.145	NO LIQUEF				
8	327	152	10	142	0.9	299.6	22	206.5	NO LIQUEF	0.94	0.186	0.145	NO LIQUEF				
23	327	437	160	277	0.8	253.5	35	200	NO LIQUEF	0.56	0.164	0.127	NO LIQUEF				
23	577	437	160	277	0.8	447.3	35	200	NO LIQUEF	0.56	0.164	0.127	NO LIQUEF				
40	577	760	330	430	0.7	400.7	35	200	NO LIQUEF	0.55	0.180	0.140	NO LIQUEF				

<b>D31-DH</b>																	
$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.94													a=	0.022		
v	0.30													b=	2.8		
falda	4.5													M=	6.8	amax=	0.285
gn	19													MSF=	1.29		
<b>z</b>	<b>Vs</b>	<b><math>\sigma_v</math></b>	<b>u</b>	<b><math>\sigma'_v</math></b>	<b>cv</b>	<b>Vs1</b>	<b>FC</b>	<b>Vs1*</b>	<b>CRR,7.5</b>	<b>rd</b>	<b>CRS</b>	<b>CRS,M</b>	<b>FSL</b>				
m da p.c.	m/s	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[m/s]	[%]	[m/s]									
1	114	19	0	19													
2	114	38	0	38	1.3	145.2	35	200									
2	273	38	0	38	1.3	347.7	35	200									
4	273	76	0	76	1.1	292.4	35	200									
4	336	76	0	76	1.1	359.9	35	200	NO LIQUEF	0.97	0.180	0.140	NO LIQUEF				
8	336	152	35	117	1.0	323.1	35	200	NO LIQUEF	0.94	0.226	0.176	NO LIQUEF				
8	397	152	35	117	1.0	381.7	18	208.5	NO LIQUEF	0.94	0.226	0.176	NO LIQUEF				
12	397	228	75	153	0.9	357.0	18	208.5	NO LIQUEF	0.85	0.236	0.183	NO LIQUEF				
12	616	228	75	153	0.9	553.9	35	200	NO LIQUEF	0.85	0.236	0.183	NO LIQUEF				
15	616	285	105	180	0.9	531.8	35	200	NO LIQUEF	0.77	0.227	0.177	NO LIQUEF				
15	805	285	105	180	0.9	695.0	35	200	NO LIQUEF	0.77	0.227	0.177	NO LIQUEF				
30	805	570	255	315	0.8	604.3	35	200	NO LIQUEF	0.55	0.184	0.143	NO LIQUEF				

<b>D33-DH</b>																	
$\rho$ (t/m <sup>3</sup> )	1.94													a=	0.022		
v	0.30													b=	2.8		
falda	7													M=	6.8	amax=	0.285
gn	19													MSF=	1.29		
<b>z</b>	<b>Vs</b>	<b><math>\sigma_v</math></b>	<b>u</b>	<b><math>\sigma'_v</math></b>	<b>cv</b>	<b>Vs1</b>	<b>FC</b>	<b>Vs1*</b>	<b>CRR,7.5</b>	<b>rd</b>	<b>CRS</b>	<b>CRS,M</b>	<b>FSL</b>				
m da p.c.	m/s	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[-]	[m/s]	[%]	[m/s]									
1	161	19	0	19													
2	161	38	0	38	1.3	205.1	35	200									
2	168	38	0	38	1.3	214.0	35	200									
3	168	57	0	57	1.2	193.3	35	200									
3	467	57	0	57	1.2	537.5	35	200	NO LIQUEF	0.98	0.181	0.141	NO LIQUEF				
10	467	190	30	160	0.9	415.2	35	200	NO LIQUEF	0.91	0.200	0.155	NO LIQUEF				
10	386	190	30	160	0.9	343.2	35	200	NO LIQUEF	0.91	0.200	0.155	NO LIQUEF				
20	386	380	130	250	0.8	307.0	35	200	NO LIQUEF	0.64	0.180	0.140	NO LIQUEF				
20	757	380	130	250	0.8	602.0	35	200	NO LIQUEF	0.64	0.180	0.140	NO LIQUEF				
30	757	570	230	340	0.7	557.5	35	200	NO LIQUEF	0.55	0.171	0.133	NO LIQUEF				

Le indagini sismiche escludono potenziale rischio di liquefazione.



NUOVO COLLEGAMENTO PALERMO – CATANIA  
TRATTA PM PALOMBA - CATENANUOVA  
PROGETTO DEFINITIVO

Relazione Tecnica Valutazione Rischio Liquefazione

COMMESSA	LOTTO	CODIFICA	DOCUMENTO	REV.	FOGLIO
RS3E	50	D 78 RH	GE0006 007	A	31 di 31

## 5.6 Sintesi risultati

Dall'analisi dei risultati delle indagini eseguite (descrizioni stratigrafiche, prove SPT, analisi di laboratorio, documentazione fotografica, sismiche Down-Hole), non si ha evidenza di strati e/o livelli di terreni sotto falda, potenzialmente liquefacibili.

Quindi per l'intero tracciato si può escludere potenziale rischio di liquefazione dei terreni.