



**TAP PMC PROJECT  
TRANS ADRIATIC PIPELINE AG**

**VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE DEL GASDOTTO  
TRATTA ONSHORE - ITALIA**

The present document or drawing is property of Trans Adriatic Pipeline AG and shall not, under any circumstances, be totally or partially, directly or indirectly, transferred, reproduced, copied, disclosed or used, without its prior written consent, for any purpose and in any way other than that for which it is specifically furnished or outside the extent of the agreed upon right of use.

REV.	DATE	STATUS	WRITTEN BY (name & visa)	CHECKED BY (name & visa)	APPROV./AUTHOR.BY (name & visa)	COMPANY APPROVAL (name & visa)
A	26-NOV- 2015	EMESSO PER APPROVAZIONE	SGI	S. PISELLI P. PADILLA	M. BAMBARA M. GUGLIELMI	

DOCUMENT REVISIONS



Trans Adriatic  
Pipeline

TAP AG Project Title / Facility Name:

**Trans Adriatic Pipeline Project**

Document Title:

**Verifica del Potenziale Di Liquefazione del Gasdotto  
Tratta Onshore - Italia**

Rev.	Revision Date (dd-mm-yyyy)	Reason for issue and Abbreviation for it, e.g,	IFLA	Prepared by	Checked by	Approved by
A	26-11-2015	EMESSO PER APPROVAZIONE		SGI	GP/PP	WB/MG

	<i>Contractor Name:</i>	Studio Geotecnico Italiano Srl
	<i>Contractor Project No.:</i>	8790
	<i>Contractor Doc. No.:</i>	08790-070R01E01
	<i>Tag No's.:</i>	

<i>TAP AG Contract No.: C480</i>	<i>Project No.: 2529</i>
----------------------------------	--------------------------

<i>PO No.:</i>	<i>RD Code:</i>	<i>Page: 1 of 25</i>
----------------	-----------------	----------------------

<i>TAP AG Document No.:</i>
<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	2 of 25

## INDICE

		Pagina
1.	INTRODUZIONE	3
1.1	Descrizione del Progetto TAP	3
1.2	Descrizione della condotta nel tratto italiano	3
2.	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	4
2.1	Normative e standard	4
2.2	Riferimenti	5
2.3	Documenti di Progetto	6
3.	CARATTERISTICHE DEL TRACCIATO	6
4.	DEFINIZIONE DELL'AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE	6
5.	VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	12
5.1	Generale	12
5.2	Condizioni di esclusione da verifica a liquefazione	13
5.3	Caratteristiche dei terreni e indagini geotecniche di riferimento per le analisi	15
5.4	Livello di saturazione	16
5.5	Metodo di verifica del potenziale di liquefazione	17
5.6	Risultati delle verifiche a liquefazione	21
6.	STABILITÀ GENERALE DEI VERSANTI IN CONDIZIONI SISMICHE	25

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	3 of 25

## 1. INTRODUZIONE

### 1.1 Descrizione del Progetto TAP

Trans Adriatic Pipeline (TAP) è un progetto per la costruzione di un nuovo gasdotto per il trasporto del gas naturale dalla Regione Caspica all'Europa Centrale e Meridionale. Il gasdotto, lungo circa 871 km, partirà dalla Grecia, in prossimità del confine con la Turchia, attraverserà l'Albania e il Mar Adriatico per raggiungere nuovamente la terra ferma all'altezza dell'Italia meridionale. In questo modo il gas confluirà direttamente dalla regione del Mar Caspio ai mercati europei.

### 1.2 Descrizione della condotta nel tratto italiano

Il sistema offshore copre il gasdotto sottomarino attraverso il mare Adriatico dalla costa albanese fino alla Puglia, regione dell'Italia meridionale, per il successivo trasporto verso l'Europa occidentale. Il sistema offshore consiste in un gasdotto di circa 105 km di lunghezza in mare aperto, con approdi sia in Albania che in Italia.

L'approdo italiano del gasdotto è ubicato sulla costa tra San Foca e Torre Specchia Ruggeri nel comune di Melendugno, mentre la zona di approdo albanese si trova a Nord-Ovest della località di Fier.

Il progetto prevede anche la posa di un cavo in fibra ottica, installato parallelamente al gasdotto, atto a consentire la comunicazione tra il terminale di ricezione TAP, le stazioni di compressione in Albania e Grecia, nonché le stazioni delle valvole di sezionamento realizzate lungo i circa 871 km del gasdotto.

Nel tratto italiano (vedi Figura 1-1) il sistema consiste in:

1. una condotta offshore lunga circa 24,5 km, dal confine delle acque territoriali italiane fino alla costa nazionale (KP 80,6 – KP 105,026, dove KP 0 è il punto di approdo albanese);
2. una condotta onshore lunga circa 7,965 km (KP 0,110 – KP 8,075). Dall'estremo a terra del tunnel (entrata, vedi Figura 1-1) all'origine del tratto onshore è previsto un tratto di 110 m di competenza offshore;
3. un terminale di ricezione (di seguito, PRT) in prossimità di Melendugno, in provincia di Lecce, con una capacità iniziale nominale di 10 BCM (con possibilità di estensione fino a 20 BCM) di gas naturale all'anno (circa 1.190.000 metri cubi standard all'ora).
4. Il pozzo di trivellazione del micro-tunnel (punto di entrata), in prossimità dell'approdo, corrisponde al KP 104,916.

Il punto di intersezione tra il gasdotto offshore e quello onshore è ubicato 110 m a valle dell'ingresso del micro-tunnel corrispondente al KP 105,026 (fine della sezione offshore) e al KP 0,110 (inizio della sezione onshore).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	4 of 25

Nel presente documento verrà trattata la verifica della suscettibilità alla liquefazione riferita esclusivamente alla condotta onshore – tratto Italia – come indicato al punto 2 del precedente elenco.

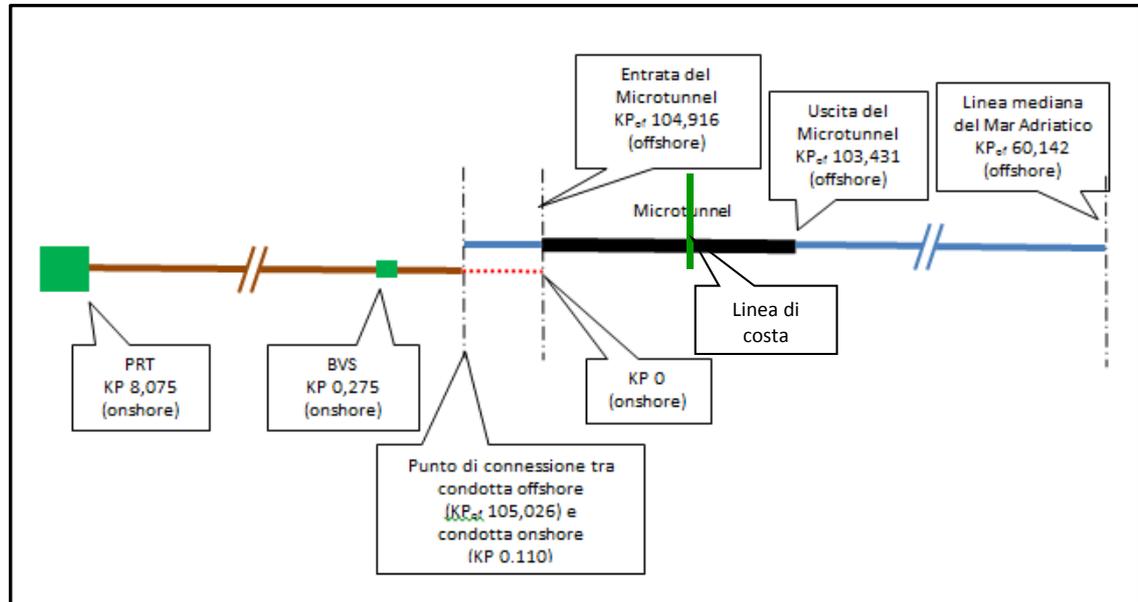


Figura 1-1: Trans Adriatic Pipeline – Visione d'insieme

## 2. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

La documentazione di riferimento è stata raggruppata come segue:

- Normative e standard;
- Riferimenti generali;
- Documenti di Progetto.

Se non espressamente indicato, è da considerare applicabile l'ultima revisione disponibile del documento.

### 2.1 Normative e standard

- /1/ ALA (2001), Guidelines for the design of buried steel pipe, American Lifelines Alliance.
- /2/ ASCE (1984), Guidelines for the seismic design of Oil and Gas pipeline system, American Society of Civil Engineers.
- /3/ ASME (2007), B31.8 Standard: Gas Transmission & Distribution Piping Systems, American Society of Mechanical Engineers DNV-OS-F101, Submarine Pipeline System, Agosto 2012
- /4/ Decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 Gennaio 2008: approvazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2008).
- /5/ Circolare 2 febbraio 2009, n. 617 - Istruzioni per l'applicazione delle "Nuove norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008
- /6/ CEN [Comité Européen de Normalisation, 2003]. Eurocode 8: Design of Structures for earthquake resistance. Document EN 1998-1, Brussels.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	5 of 25

## 2.2 Riferimenti

- /7/ Boulanger R.W. and Idriss I.M. (2011). "Cyclic failure and liquefaction: current issues". Proc. 5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Santiago, Chilean geotechnical Society, pp. 137-159.
- /8/ Convenzione INGV-DPC 2004 – 2006, Progetto S1, Proseguimento della assistenza al DPC per il completamento e la gestione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 e progettazione di ulteriori sviluppi, Coordinatore: Carlo Meletti (INGV). Sito web: <http://esse1.mi.ingv.it/>.
- /9/ Hynes, M.E., and Olsen, R.S. (1999), "Influence of confining stress on liquefaction resistance", Proc., Int. Workshop on Phys. And Mech. Of Soil Liquefaction, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 145-152.
- /10/ Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2004), "Semi-empirical procedures for evaluating liquefaction potential during earthquakes". In: Proceedings, 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake engineering, and 3d International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. D. Doolin et al., eds., Stallion press, Vol. 1, pp. 32-56.
- /11/ Iwasaki T., Tokida K., Tatsuoka F., Watanabe S., Yasuda S. and Sado H. (1982). "Microzonation for soil liquefaction potential using simplified methods", Vol III, Proc. 3rd Intl. Conf. on Microzonation, Seattle, pp. 1319-1330.
- /12/ Liao, S.C.C. and Whitman, R.V. (1986), "Overburden Correction Factors for SPT in sand", Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 112, No. 3, 373-377.
- /13/ Ohta Y., Goto N. (1978). Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristic soil indexes, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 6, pp. 167-187.
- /14/ Rovida, A., Camassi, R., Gasperini P. e Stucchi, M. (a cura di), 2011. CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>, DOI: 10.6092/INGV.IT-CPTI11.
- /15/ Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1971), "Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential", Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, 97(9), pp.1249-1273.
- /16/ Seed, H.B. and Idriss, I.M. (1982), "Ground motions and soil liquefaction during earthquakes", Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, CA, USA.
- /17/ Seed, R.B., Tokimatsu, K., Harder, L.F., Chung, L.M. (1985), "The influence of SPT procedures in soil liquefaction resistance evaluations", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, 111(12), pp.1425-1445.
- /18/ Youd, T.L., Idriss, I.M., Andrus, R.D., Castro, G., Christian, J.T., Dobry, R., Finn, L.W.D., Harder, L.F. Jr., Hynes, M.H., Ishihara, K., Koester, J.P., Liao, S.S.C., Marcuson, W.F. III, Martin, G.R., Mitchell, J.K., Moriwaki, Y., Power, M.S., Robertson, P.K., Seed, R.B. and Stokoe, K.H. II (2001), "Liquefaction Resistance of Soil: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils", Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 127, n° 10, pp.817-833.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	6 of 25

### 2.3 Documenti di Progetto

- /19/ IPL00-URS-000-Q-TRG-0001 Studio geotecnico e geofisico lungo il tracciato del gasdotto – Italia
- /20/ OPL00-SPF-200-G-TRX-0017 Prescrizione A18 – Approdo Italiano Analisi Sismica del Micro-tunnel

### 3. CARATTERISTICHE DEL TRACCIATO

Il DM 17/04/2008 prescrive una copertura minima della condotta non inferiore di 0.9 m, 0.4 m in terreno roccioso, dalla superficie superiore del tubo. TAP AG intende seguire la pratica costruttiva per gasdotti in Italia che prevede una copertura minima pari a 1.5 m, in modo da fornire le massime garanzie di sicurezza da eventuali interferenze con le attività umane (scavo, scasso del terreno per scopi agricoli, ecc). Si rimanda ai documenti di progetto relativi per una descrizione di dettaglio della sezione tipo di interrimento.

A vantaggio di sicurezza e strettamente ai fini delle verifiche di cui al presente documento, non si terrà conto della profondità di interrimento della tubazione analizzando la stabilità alla liquefazione delle aree interessate a partire dal piano campagna di esecuzione delle indagini geotecniche.

Per la descrizione del tracciato di progetto si rimanda alla documentazione di progetto relativa.

### 4. DEFINIZIONE DELL’AZIONE SISMICA DI RIFERIMENTO PER LE VERIFICHE A LIQUEFAZIONE

La determinazione del potenziale di liquefazione è stata condotta per il periodo di ritorno dell’azione sismica corrispondente a quello dello stato limite ultimo di verifica (SLV, Stato Limite di salvaguardia della Vita) utilizzando i valori di pericolosità sismica al sito determinati su base delle NT2008 (Doc. Rif. /4/).

In particolare, l’azione sismica in base alla quale va valutato il rispetto dei diversi stati limite deve essere definita a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione, a sua volta espressa in termini di accelerazione orizzontale massima attesa  $a_g$  in condizioni di campo libero su suolo rigido, con superficie topografica orizzontale.

La definizione dell’azione sismica comprende la determinazione delle ordinate dello spettro di risposta elastica in accelerazione  $S_e(T)$  “ancorato” al valore di  $a_g$ , facendo riferimento a prefissate probabilità di eccedenza  $P_{VR}$  nel periodo di riferimento  $V_R$  per la vita utile della struttura (funzione della sua vita nominale  $V_N$  e della classe d’uso,  $C_u$ ). Data la probabilità di superamento nel periodo di riferimento considerato, funzione dello Stato Limite considerato per la verifica, la forma spettrale è definita a partire dai valori dei seguenti parametri relativi ad un sito di riferimento rigido e orizzontale:

- $a_g$  accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale;
- $F_o$  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.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	7 of 25

La Vita Nominale  $V_N$  di un'opera, intesa come il numero di anni in cui essa possa essere usata per lo scopo al quale è destinata, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, è così definita dalle NTC2008:

- $V_N \leq 10$  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 oggetto (opera infrastrutturale di elevata importanza, anche se non strategica ai fini dell'azione della Protezione Civile), in linea con quanto effettuato per la tratta limitrofa in microtunnel, ed ai fini della definizione dell'azione sismica di verifica alla liquefazione, verrà assunto cautelativamente:

$$V_N = 100 \text{ anni e Classe d'Uso IV } (C_u = 2)$$

Il periodo di riferimento per la definizione dell'azione sismica  $V_R$  si ottiene come segue:

$$V_R = V_N \times C_u = 200 \text{ anni}$$

L'azione sismica di progetto deve essere determinata in funzione degli Stati Limite relativi all'opera da verificare 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 NTC2008 al par. 3.2.1 sono:

- Stati Limite Ultimi (**SLU**):
  - Stato Limite di Salvaguardia della Vita umana, **SLV**, definito come lo stato limite in cui 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.

Le probabilità di superamento cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente per ciascuno degli stati limite considerati sono (cfr Tab 3.2.I NTC2008):

Stati Limite	$P_{VR}$ : Probabilità di superamento in $V_R$	
Esercizio	SLO	81 %
	SLD	63 %
Ultimi	SLV	10 %
	SLC	5 %

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	8 of 25

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 specifico, per la verifica alla liquefazione, si ottiene  $T_R = 1898$  anni.

Le Norme Tecniche presentano in allegato la tabella dei valori  $a_g$  (accelerazione orizzontale massima su sito rigido e superficie topografica orizzontale),  $F_o$  (valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale) e  $T_{c^*}$  (periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale), assegnati in corrispondenza di una griglia di punti distribuiti sull'intero territorio nazionale. I corrispondenti valori per luoghi intermedi della griglia (individuati dalle loro coordinate geografiche) si ottengono per interpolazione sui quattro punti di griglia ad essi adiacenti.

Ai fini della definizione della pericolosità sismica di riferimento, sono stati identificati tre punti notevoli corrispondenti a inizio, fine e punto mediano del tratto di tubazione di interesse (cfr. Figura 4-1), individuati dalle coordinate geografiche di cui alla Tabella 4-1. Sempre in Tabella 4-1 si riporta lo schema di localizzazione del punto di interesse rispetto ai nodi della griglia dei valori di pericolosità, ottenuto attraverso l'impiego del foglio di calcolo Spettri di Risposta SPETTRI-NTC v. 1.0.3b, distribuito dal Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (2009).

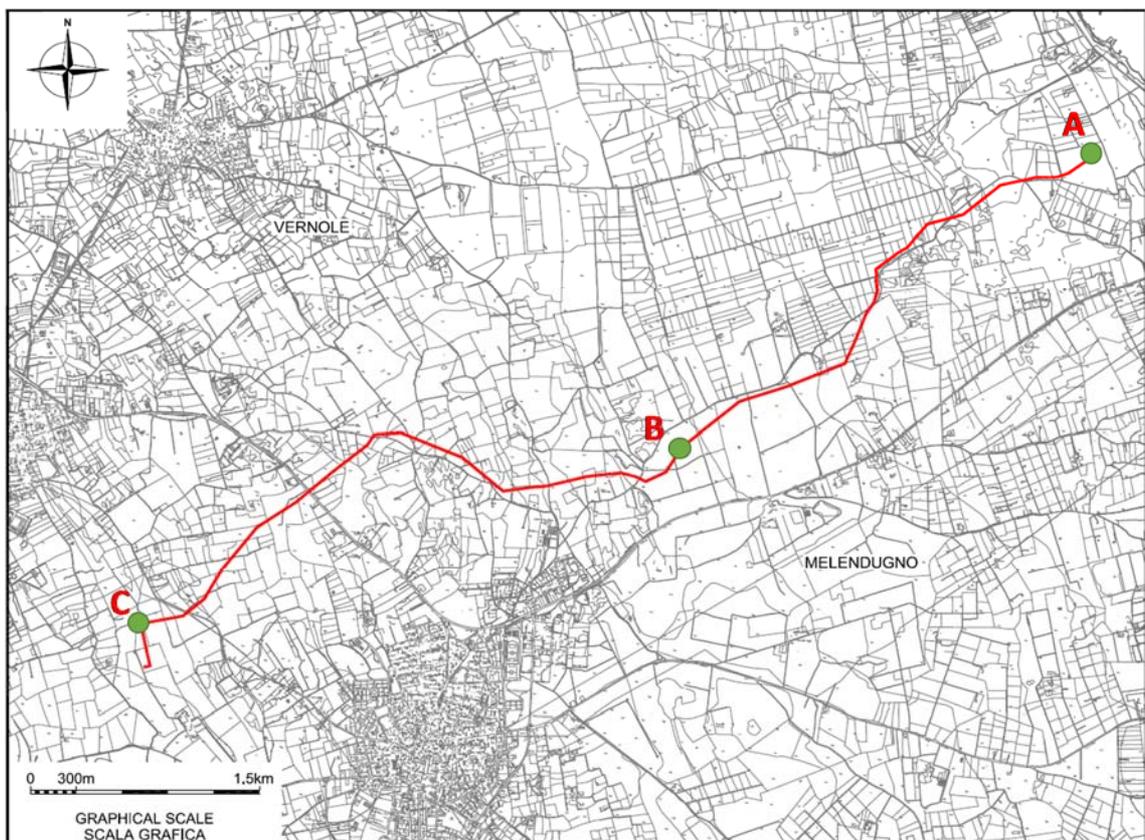
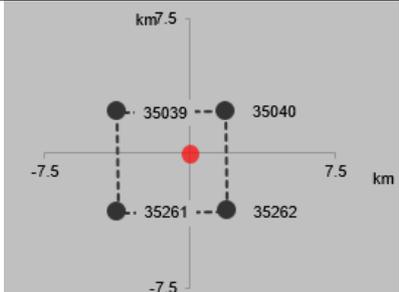
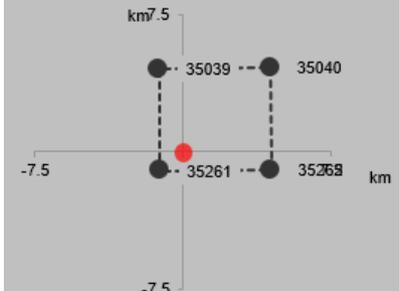
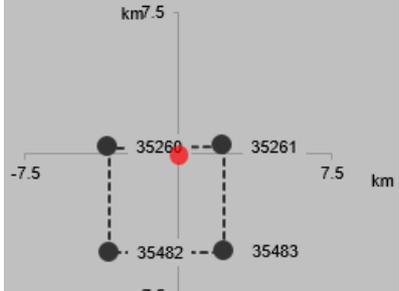


Figura 4-1: Localizzazione dei punti di interesse per la definizione dell'azione sismica di verifica del potenziale di liquefazione.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	9 of 25

Tabella 4-1: Localizzazione dei punti di interesse per la definizione dell'azione sismica di verifica alla liquefazione e reticolo di riferimento NT2008.

ID	Progressiva di riferimento	Latitudine	Longitudine	Punti della griglia adiacenti (da Spettri-NTC ver.1.0.3.xls, CSLLPP, 2009)
A - Inizio tratto di interesse (connessione col tratto in microtunnel)	0+000	40.3074°	18.3858°	
B - Punto mediano	4+000 ca.	40.2887°	18.3544°	
C - Fine del tratto di interesse (connessione alla PRT)	8+200	40.2777°	18.3143°	

Sulla base dell'interpolazione dei valori di griglia, l'accelerazione massima di progetto su suolo rigido e superficie topografica orizzontale, per i tre punti di interesse A-C risulta compresa tra 0.091 (punto C) e 0.093 g (punto A). Tenuto conto di tale sostanziale uniformità, si ritiene ragionevole adottare per l'intero tratto di interesse, un valore uniforme di pericolosità di base pari a:

$$a_g = 0.093 \text{ g}$$

L'effetto della risposta sismica locale viene qui determinato attraverso l'impiego del fattore di sito  $S$ , funzione sia della categoria di sottosuolo ( $S_s$ ), sia dell'andamento della superficie topografica ( $S_T$ ):

$$S = S_s \cdot S_T$$

Sulla base delle indicazioni fornite dal Doc. Rif. /19/, i terreni attraversati dal tracciato risultano classificabili in categoria B, da cui:

$$S_s = 1.00 \leq 1.40 - 0.40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1.20$$

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	10 of 25

Nel caso in esame risulta  $S_s = 1.2$ .

Sempre secondo le indicazioni fornite dal Doc. Rif. /19/, la superficie topografica sub-pianeggiante risulta collocabile in categoria topografica T1 da cui  $S_T = 1.0$ .

Pertanto, l'accelerazione massima di verifica del potenziale di liquefazione  $a_{max}$  risulta pari a:

$$a_{max} = 0.112 \text{ g}$$

A riguardo della magnitudo di riferimento associata al valore di pericolosità sismica sopra determinato, in assenza di uno studio specifico per il sito di progetto da cui ottenere attraverso una analisi di disaggregazione il valore di magnitudo di riferimento per la valutazione della pericolosità a liquefazione, si è tenuto conto di due differenti "fonti di dati", entrambe alla base delle definizioni dell'azione sismica di NT2008, ossia:

- a) L'analisi di disaggregazione dei valori di pericolosità sismica (accelerazione su suolo rigido orizzontale) di cui alle NTC2008, fornita quale elaborazione aggiuntiva direttamente dal progetto INGV-DPC S1.
- b) Magnitudo attesa per un periodo di ritorno pari almeno a 975 anni valutata sulla base del modello delle zone sismogenetiche ZS9 alla base delle mappe di pericolosità sismica del territorio italiano allegato alle NTC2008, e sulla distribuzione dei valori di magnitudo associati ai massimi terremoti storici.

A riguardo del punto a), in Figura 4-2 viene illustrato il risultato dell'analisi di disaggregazione della pericolosità sismica svolta per il punto di griglia mediano rispetto al tracciato N. 35261. Come si evince dal grafico, nella definizione dei valori di pericolosità sismica al sito hanno prevalso nelle elaborazioni DPC-INGV alla base delle NTC2008 terremoti con valori di magnitudo elevati (attorno a 6-7) ma con epicentri a distanze altrettanto elevate (50-80Km), da cui il valore di pericolosità moderato.

Un'ulteriore valutazione basata sulla Zonazione Sismogenetica ZS9 (cfr. sempre progetto DPC-INGV S1, estratto in Figura 4-3), anche essa alla base della valutazione di pericolosità sismica di cui alle NTC2008 indica come le zone sismogenetiche più prossime al sito siano 931 ( $M_{w,max} = 6.83$ ,  $d = 50\text{Km}$ ), 926 ( $M_{w,max} = 6.83$ ,  $d = 100\text{Km}$ ) e 930 ( $M_{w,max} = 6.60$ ,  $d = 125\text{Km}$ , meno significativa). Una ulteriore analisi statistica condotta per intervalli di completezza della magnitudo, indica un valore atteso della magnitudo per la zona 931 pari a 6.9.

Sulla base dell'analisi sopra descritta, è stato considerato ragionevole assumere per il tracciato di progetto un valore di magnitudo di riferimento cautelativo pari a 6.9, da adottare nelle verifiche a liquefazione di cui ai paragrafi successivi.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	11 of 25

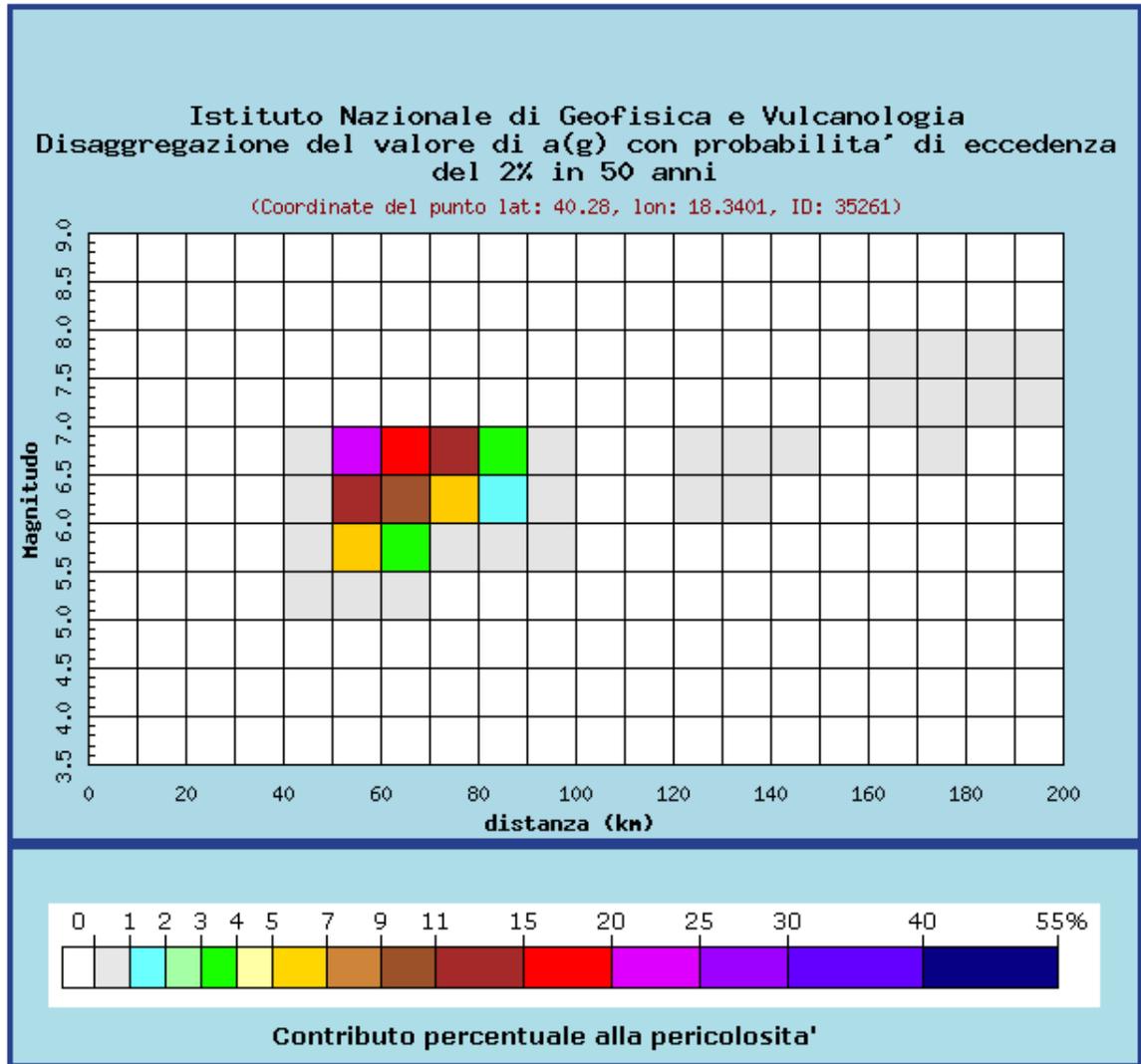


Figura 4-2: Analisi di disaggregazione del dato di pericolosità al sito di progetto, da elaborazioni DPC-INGV S1 (<http://zonesismiche.mi.ingv.it>). Punto di griglia N. 35261 (Melendugno).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	12 of 25



Figura 4-3: Zone sismogenetiche più prossime al sito di progetto (elaborazione da ZS9, Progetto S1, INGV).

## 5. VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

### 5.1 Generale

Le NTC 2008, al par. 7.11.3.4.1 stabiliscono:

*Il sito presso il quale è ubicato il manufatto (l'opera, ndr.) deve essere stabile nei confronti della liquefazione, intendendo con tale termine quei fenomeni associati alla perdita di resistenza al taglio o ad accumulo di deformazioni plastiche in terreni saturi, prevalentemente sabbiosi, sollecitati da azioni cicliche e dinamiche che agiscono in condizioni non drenate.*

*Se il terreno risulta suscettibile di liquefazione e gli effetti conseguenti appaiono tali da influire sulle condizioni di stabilità di pendii o manufatti, occorre procedere ad interventi di consolidamento del terreno e/o trasferire il carico a strati di terreno non suscettibili di liquefazione.*

*In assenza di interventi di miglioramento del terreno, l'impiego di fondazioni profonde richiede comunque la valutazione della riduzione della capacità portante e degli incrementi delle sollecitazioni indotti nei pali.*

Allo scopo di accertare la stabilità del sito di progetto nei confronti della liquefazione si è proceduto attraverso una valutazione di pericolosità condotta mediante l'applicazione di metodi empirici basati sui risultati delle prove penetrometriche dinamiche di tipo SPT.

A causa della breve durata del moto sismico, il terreno reagisce in condizioni sostanzialmente non drenate. In tali condizioni, il comportamento non lineare dei materiali sabbiosi e sabbioso/limosi sottoposti a carichi ciclici indotti dal terremoto porta

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	13 of 25

alla generazione di sovrappressioni interstiziali con diminuzione anche significativa di rigidità e resistenza. Alla successiva dissipazione delle sovrappressioni interstiziali corrisponde la generazione di deformazioni permanenti in grado di causare, nello specifico, problematiche di esercizio della linea post-sisma, stabilità dei rilevati e delle opere di attraversamento.

Il fenomeno della liquefazione è profondamente influenzato dal numero dei cicli equivalente N del terremoto, dalla densità relativa  $D_r$  e dalla granulometria del terreno. Un materiale non coesivo, 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 di sollecitazione).

In questo contesto, il problema principale che si pone in fase di progettazione è valutare la stabilità del sito di progetto rispetto al fenomeno della liquefazione quando il terreno di fondazione comprenda strati estesi o lenti spesse di sabbie sciolte sotto falda, anche se contenenti una frazione fine limoso-argillosa.

## 5.2 Condizioni di esclusione da verifica a liquefazione

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

- 1) Eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
- 2) Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di 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 comprese tra le curve rappresentate in *Figura 5-1* (coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$ ) e *Figura 5-2* (coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ ).

Nessuna delle suddette esclusioni risulta a priori applicabile al caso in esame.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	14 of 25

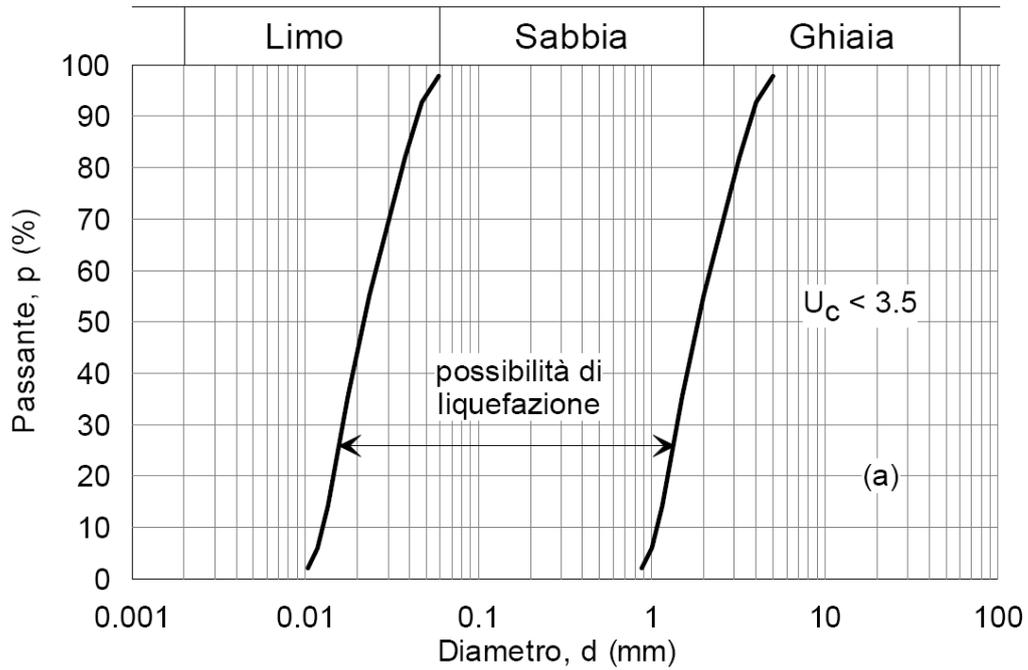


Figura 5-1: Ambito di potenziale di liquefacibilità dei terreni ( $U_c < 3.5$ ).

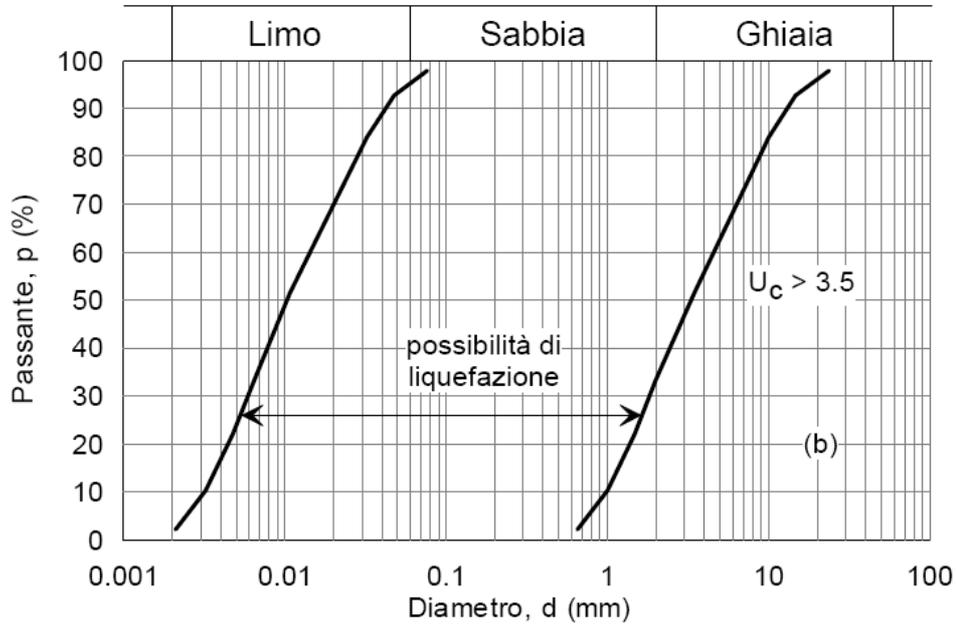


Figura 5-2: Ambito di potenziale di liquefacibilità dei terreni ( $U_c > 3.5$ ).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	15 of 25

### 5.3

#### **Caratteristiche dei terreni e indagini geotecniche di riferimento per le analisi**

Per una descrizione del tracciato di progetto in relazione all'inquadramento tettonico, geologico e geotecnico delle aree attraversate si rimanda qui interamente al Doc. Rif. /19/. Oltre alle prove geofisiche, si ricorda che lungo il tracciato di progetto sono state eseguiti complessivamente 18 sondaggi a carotaggio continuo con prove SPT e prelievo di N. 20 campioni tra disturbati ed indisturbati per l'esecuzione di prove di classificazione e resistenza, oltre alla determinazione del RQD nei campioni prelevati in roccia.

Ai fini della verifica a liquefazione, basata sostanzialmente sui dati SPT si ricorda che (sempre da /19/):

- *la gran parte delle SPT è stata eseguita su terreni appartenenti alla unità b1 (ossia sabbia, limo sabbioso sabbia limosa, più raramente limo argilloso, n.d.r.), eccetto che per i sondaggi BH11\_ter SPT1 e BH1B (sabbia limosa marrone/calcarenite alterata e fratturata), BH5 SPT1 (calcarenite giallastra molto alterata e fratturata) ed infine BH11 SPT1 (sabbia limosa marrone);*
- *I valori  $N_{spt}$  vanno da 15 a 18 nelle prove eseguite nei campioni prelevati dall'unità b1, quindi i terreni di tale unità possono essere classificati come terreni da sciolti a molto densi (Terzaghi-Peck, 1948) ed il loro angolo di attrito varia tra 25.5 e 34.9 ° (De Mello, 1971).*

In Tabella 5-1 si riporta una sintesi dei risultati delle prove SPT condotte, mentre in Tabella 5-2 (sempre tratta da Doc. Rif. /19/) la sintesi è riferita ai risultati delle prove di laboratorio.

Tabella 5-1: Sintesi dei risultati delle prove SPT eseguite (da Doc. Rif. /19/).

ID SONDAGGIO	ID SPT	PROF. m da p.c.	UNITÀ	$N_{SPT}$	$(N_1)_{60}$
BH11	SPT1	0,50÷0,95	a	4	3
BH11_TER	SPT1	0,50÷0,95	a/c	65	52
BH1B	SPT1	0,50÷0,95	a/c	51	41
BH8	SPT1	0,50÷0,95	a/b1	51	41
BH3	SPT1	3,00÷3,45	b1	36	24
BH3	SPT2	6,20÷6,65	b1	10	10
BH3	SPT3	9,50÷9,95	b1	18	18
BH3B	SPT1	1,50÷1,95	b1	78	68
BH4	SPT1	4,00÷4,45	b1	12	12
BH4	SPT2	6,00÷6,45	b1	38	38
BH5	SPT2	7,00÷7,45	b1	73	44
BH6	SPT1	1,00÷1,45	b1	91	45
BH6	SPT2	2,80÷3,25	b1	70	40
BH6	SPT3	7,00÷7,45	b1	24	20
BH7BIS	SPT1	0,50÷0,95	b1	7	6
BH5	SPT1	1,00÷1,45	b2	51	28
ST_BH1	SPT1	6,00÷6,45	-	46	-
ST_BH1	SPT2	9,00÷9,45	-	18	-
ST_BH2	SPT1	2,60÷3,05	-	35	-
ST_BH2	SPT2	5,00÷5,45	-	24	-
ST_BH2	SPT3	8,00÷8,45	-	33	-
ST_BH2	SPT4	11,00÷11,45	-	15	-
ST_BH2	SPT5	17,00÷17,45	-	59	-

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	16 of 25

Tabella 5-2: risultati prove di laboratorio svolte sui campioni prelevati (da Doc. Rif. /19/).

ID del campione	Prof. di prelievo (m da p.c.)	$\gamma_n$ (KN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (KN/m <sup>3</sup> )	W (%)	G (-)	n (%)	E (-)	S (%)	k (m/sec)
BH 1B ter-C2	4,00-4,50	-	-	22,85	2,64	-	-	-	
BH3-C1	3,00-3,45	-	-	18,84	-	-	-	-	
BH3-C2	6,20-6,65	-	-	26,36	-	-	-	-	
BH3-C3	9,50-9,95	-	-	14,43	-	-	-	-	
BH4-C1	3,50-4,00	17,34	14,69	18,1	2,71	45,82	0,85	58,01	9,11E-06
BH4-C2	4,00-4,54	-	-	7,53	-	-	-	-	
BH4-C3	6,50-6,95	-	-	17,7	-	-	-	-	
BH 5-C1	2,80-3,40	14,25	10,96	30,08	2,65	58,60	1,42	56,23	5,13E-06
BH 6-C1	6,00-6,40	17,19	13,24	29,82	2,65	49,96	1	79,02	5,97E-07
BH 6-C2	7,00-7,45	-	-	22,89	2,67	-	-	-	
BH 7-C1	3,00-3,50	17,01	13,58	25,25	2,61	48,07	0,93	71,34	9,96E-07
BH 7-C2	7,00-7,45	-	-	30,44	2,65	-	-	-	
BH 7 bis-C1	3,00-3,30	-	-	13,36	2,71	-	-	-	
BH 7 bis-C2	3,80-4,40	14,30	11,78	21,42	2,66	55,76	1,26	45,26	1,72E-06
BH 8-C1	4,00-4,50	18,03	15,99	12,73	2,65	39,64	0,66	51,37	1,93E-06
BH 8-C2	5,00-5,40	-	-	21,52	2,70	-	-	-	
BH 9-C1	6,00-6,40	-	-	15,66	2,69	-	-	-	
BH 9 bis-C1	7,00-7,50	18,60	14,6	27,37	2,62	44,32	0,80	90,17	1,03E-05

#### 5.4 Livello di saturazione

La verifica a liquefazione è stata condotta sulla base della profondità di falda determinata sulla base dei dati piezometrici disponibili in corrispondenza di ogni verticale di indagine, sintetizzati per sondaggio in Tabella 5-3 (mostrati in ordine di progressiva crescente dal termine del tratto in microtunnel alla connessione con la PRT).

Si osserva come, spostandosi dalla connessione con il tratto in microtunnel verso la PRT l'incremento della quota del piano campagna sia accompagnato da un incremento meno che proporzionale di quota piezometrica. Di conseguenza la profondità di falda tende ad aumentare verso il termine del tratto considerato.

Nel caso di non rilievo della falda, la lunghezza dei sondaggi limitata a 10 m non permette a priori di escludere un livello di saturazione posto a profondità maggiori e, quindi, non permette di escludere a priori la verifica a liquefazione (esclusa dalle NT2008 per falda a profondità maggiore di 15 m).

In ogni caso, per le verifiche effettuate, in via cautelativa, è stata assunta una profondità di falda pari a 2.5m dal piano campagna per tutte le verticali analizzate.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	17 of 25

Tabella 5-3: dato piezometrico da rilievi condotti durante la perforazione (da Doc. Rif. /19/).

Sondaggio ID	Quota testa sondaggio mslmm	Quota livello piezometrico mslmm	Profondità di falda m
ST_BH2	7.66	3.70	3.96
ST_BH1	8.30	6.00	2.30
BH3	9.73	7.23	2.50
BH4	15.40	8.88	6.52
BH5	16.97	9.97	7.00
BH6	18.79	13.79	5.00
BH7	21.73	14.73	7.00
BH7bis	26.15	-	> 10m
BH8	27.60	-	-
BH9	29.16	-	-
BH9bis	30.31	-	-
BH9ter	35.84	-	-
BH10	36.20	-	-
BH11	37.65	-	-
BH11bis	38.74	-	-
BH11ter	41.84	-	-
BH1B	41.08	-	-
BH1Bbis	41.87	-	-
BH1Bter	44.28	-	-
BH3B	45.43	-	-

## 5.5 Metodo di verifica del potenziale di liquefazione

La valutazione di suscettibilità alla 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 terreno 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 efficace dell'accelerazione pari al 65% della accelerazione di picco  $a_{max}$  come segue:

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

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	18 of 25

dove:

$a_{max}$  accelerazione di picco al sito

$g$  accelerazione di gravità

$\tau_c$  valore rappresentativo dello sforzo di taglio ciclico

$\sigma_{vo}$  tensione verticale alla profondità in esame, in termini di tensioni totali

$\sigma'_{vo}$  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):

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

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  $M=6.9$ ) 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 scelto un valore di  $MSF = 1.3$  per  $M = 6.9$  in accordo sia alle prescrizioni dell'Eurocodice 8, 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 o CPT, come meglio descritto nel seguito.

Il procedimento utilizzato per la stima di CRR a partire dai risultati di prove SPT si basa sulla relazione riportata in Figura 5-3, originariamente proposta da Seed e Idriss (1971,1982) e da Seed et al. (1985), e successivamente confermata da Youd et al. (2001).

In Figura 5-3, i risultati delle prove SPT sono espressi in termini di numero di colpi corretti  $N_{(60)}$ , ossia i valori sono normalizzati per una pressione verticale efficace pari a 100 kPa e corretti per un valore standard di energia trasmessa (60% del valore nominale) come segue:

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

dove:

$C_N$  = coefficiente correttivo che tiene conto dell'influenza della pressione verticale efficace. In letteratura sono presenti diversi metodi per la valutazione del

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	19 of 25

coefficiente correttivo  $C_N$ . Qui è stata applicata la seguente relazione proposta da Liao e Whitman (1986):

$$C_N = \left( \frac{P_a}{\sigma'_{v0}} \right)^{0.5} \leq 1.7$$

in cui  $P_a$  è la pressione atmosferica, pari a 100kPa, e  $\sigma'_{v0}$  è la tensione verticale in sito, in termini di sforzi efficaci.

$C_E$  = 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 maglio all'attrezzo campionario, 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.

In assenza di dati su energia, lunghezza aste, tipo di attrezzo dove disponibile è stato impiegato direttamente nelle verifiche a liquefazione condotte il valore  $N_{1(60)}$  da Doc. Rif. /19/. Dove tale dato non è stato reso disponibile (cfr. Tabella 5-1), 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 campionario) sono stati assunti pari ad 1 nell'ipotesi che le prove SPT siano state eseguite sulla base delle raccomandazioni fornite dall'AGI (1977).

Sempre in Figura 5-3, 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  $M = 7.5$ . 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, come indicato in precedenza.

Si può osservare dalla Figura 5-3 che curve diverse sono state sviluppate per terreni aventi diverso contenuto di fini, a partire dalla curva di riferimento corrispondente alla sabbia pulita ( $FC < 5\%$ ).

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  $N_{1(60)CS}$ :

In cui:

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	20 of 25

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

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

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

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

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

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

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:

$\sigma'_{v0}$  = 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:

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

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

Il valore di contenuto di fine associato al valore di SPT è stato determinato sulla base delle prove di laboratorio quando disponibili. In caso di assenza di dati di laboratorio, è stato assunto cautelativamente un contenuto di fine pari al 10%.

Pertanto, in accordo a Youd et al. (2001), il valore del fattore di sicurezza rispetto alla liquefazione FL risulta dato dalla relazione:

$$FL = (CRR_{7.5}/CSR) MSF k_s$$

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	21 of 25

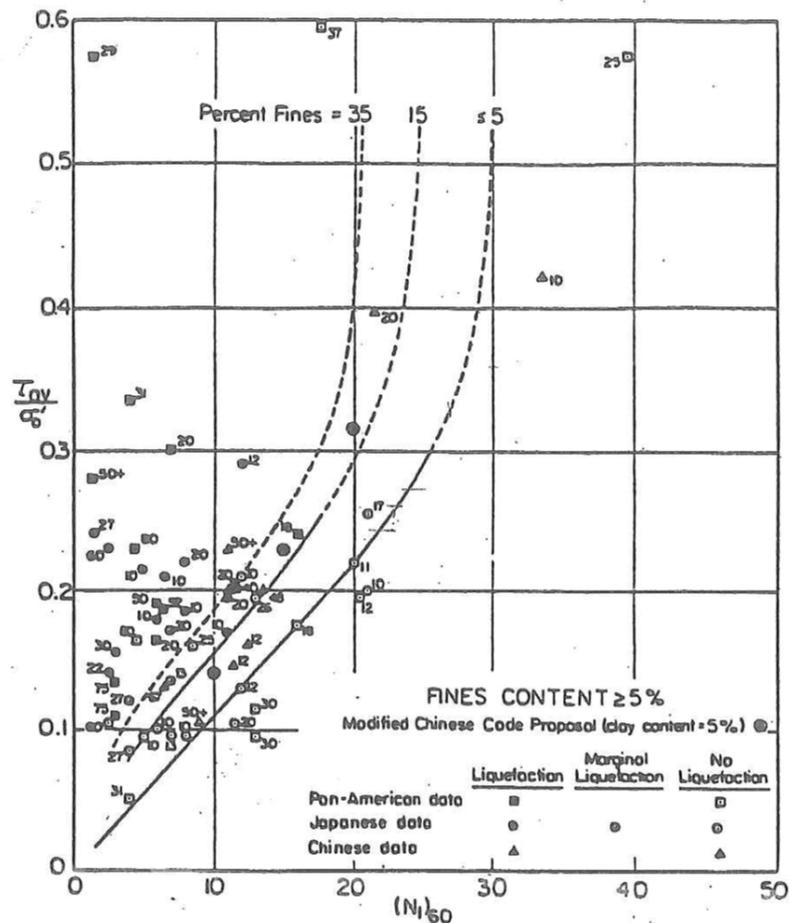


Figura 5-3: Relazione tra sforzo di taglio ciclico a liquefazione e  $N_{1(60)}$  – sisma di riferimento Magnitudo = 7.5 (Seed et al., 1985)

## 5.6 Risultati delle verifiche a liquefazione

La verifica alla liquefazione dei terreni presenti lungo il tracciato di progetto descritta ai paragrafi precedenti è stata condotta sull'intero database delle prove SPT effettuate, considerando la definizione della pericolosità sismica di cui al par. 4. I risultati sono riportati in dettaglio in Figura 5-4 e Figura 5-5, aggregati per tutte le verticali esaminate. In particolare, i grafici mostrano i risultati delle analisi nei seguenti termini:

- Valore SPT misurato a ciascuna profondità, a partire dal piano campagna in tutti i sondaggi disponibili.
- 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, definito singolarmente per ogni valore SPT.
- Valori  $N_{1(60)CS}$ , ovvero del 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 ( $M = 6.9$ ) e i valori puntuali della resistenza allo sforzo di taglio sismico calcolati per tutti i valori di SPT che non siano stati

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	22 of 25

esclusi dal calcolo di suscettibilità alla liquefazione perché classificati come non liquefacibili (si veda quanto detto nei paragrafi precedenti).

- Valore del fattore di sicurezza ottenuto come rapporto CRR/CSR per ogni dato e rapporto di sovrappressione interstiziale  $r_u$ . 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 un sostanziale rispetto del criterio sopra espresso per tutte le verticali esaminate, con valori del rapporto di sovrappressione interstiziale  $r_u$  che, allorché valutabili, risultano sempre inferiori a 0.4 (a liquefazione il rapporto è pari all'unità).

Il Liquefaction Potential Index è definito da Iwasaki et al. (1982) come:

$$LPI = \int_0^{20} F(z) \cdot W(z) dz$$

dove  $W(z)$  è una funzione di peso che diminuisce con la profondità  $z$  secondo le relazione:

$$W(z) = 10 - \frac{1}{2} z$$

La funzione  $F(z)$  riflette il potenziale di liquefazione di ogni strato esaminato, dipendendo direttamente dal fattore di sicurezza  $FL$  come segue:

$$\begin{aligned} FL \geq 1 & \quad F(z) = 0 \\ FL < 1 & \quad F(z) = 1 - FL \end{aligned}$$

Nel caso in esame,  $LPI = 0.0$  per tutte le verticali (per  $LPI < 0.3$  la pericolosità alla liquefazione nulla o trascurabile).

Pertanto, sulla base dei dati disponibili, è ragionevole concludere che la tratta di tubazione esaminata risulta stabile rispetto ai fenomeni di liquefazione.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	23 of 25

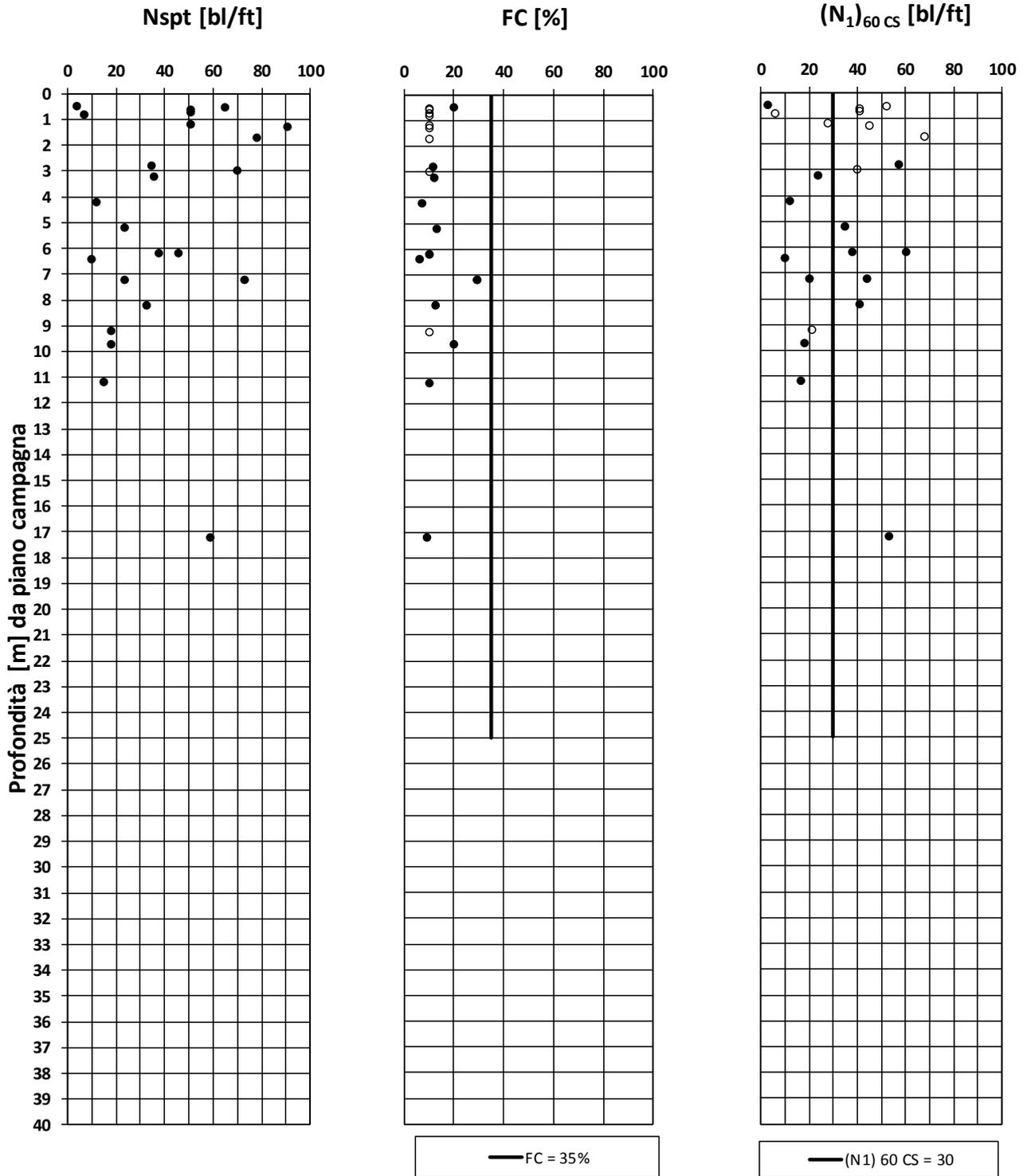


Figura 5-4: Dati di input e risultati di verifica del potenziale di liquefazione (NCEER; Youd et al. 2001). Da sinistra: valori  $N_{SPT}$  misurati, contenuto di fine (punti pieni - dato di laboratorio, punti vuoti - FC=10%),  $(N_1)_{60,CS}$ .

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	24 of 25

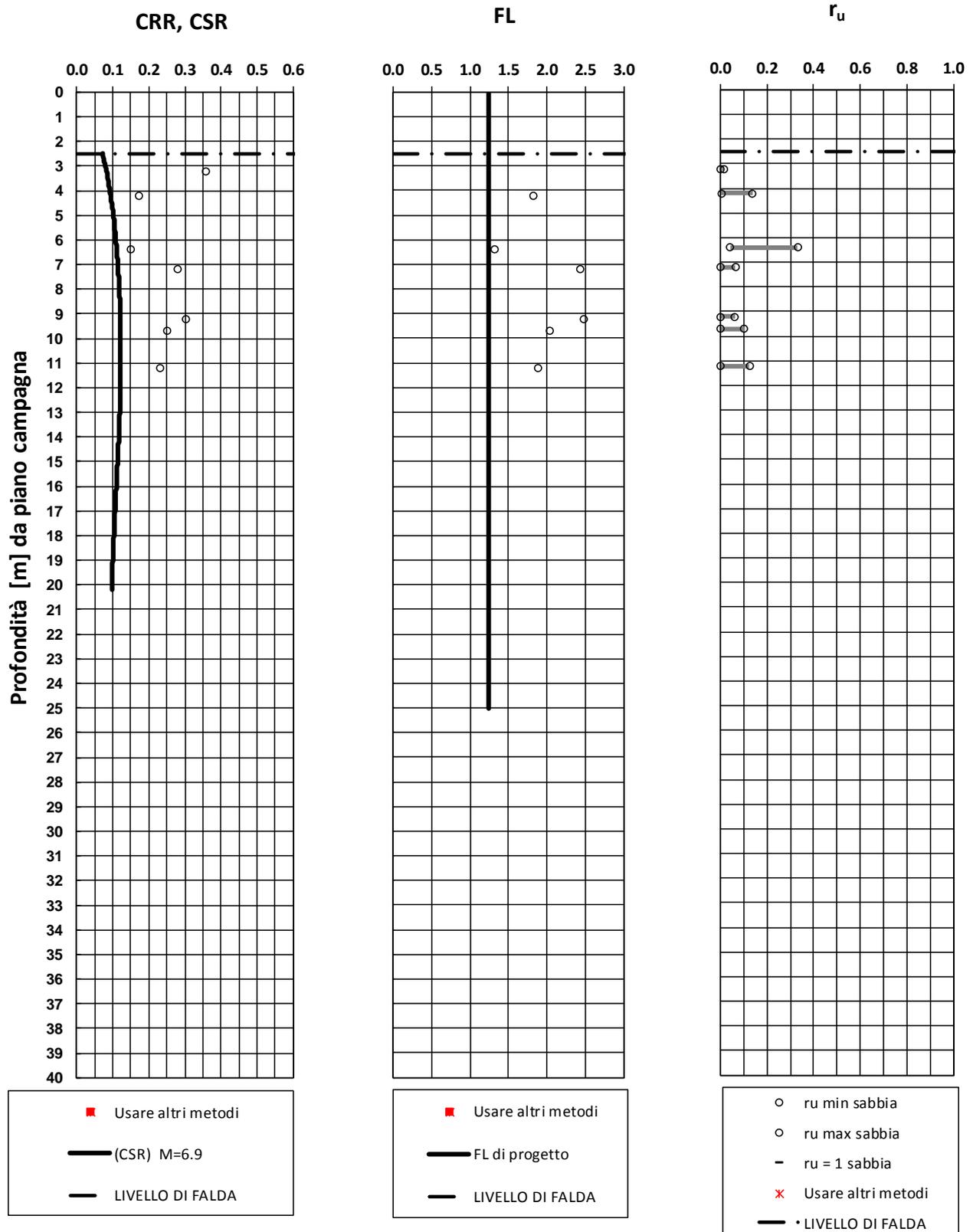


Figura 5-5: Risultati della verifica del potenziale di liquefazione (NCEER; Youd et al. 2001). Da sinistra: CRR-CSR, fattore di sicurezza FL, rapporto di sovrappressione interstiziale  $r_u$ .

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	<b>IPL00-TPI-000-Y-TCE-0002</b>	Rev. No.:	A
	Doc. Title:	<b>Verifica alla liquefazione – Tratto Onshore - Italia</b>	Page:	25 of 25

## 6. STABILITÀ GENERALE DEI VERSANTI IN CONDIZIONI SISMICHE

Una volta determinato il potenziale di liquefazione del sito (cfr. paragrafi precedenti), è stata effettuata una ulteriore verifica della porzione di territorio attraversata dalla route della tubazione in termini di pericolosità rispetto a fenomeni di instabilità dei versanti in condizioni sismiche. Pur essendo in questi casi necessario analizzare nel dettaglio le singole situazioni geomorfologiche, è stato condotto un inquadramento generale dell'area di interesse in termini di pendenza media dei versanti. In particolare, è stata eseguita una interpretazione dei dati di elevazione del terreno (modello DTM) in termini di pendenza, a valle dell'applicazione della procedura di upsampling a griglia di apertura 24 m (per evitare la presa in conto di variazioni topografiche locali, di minore interesse per le analisi condotte). I risultati dell'analisi condotta sono rappresentati in Figura 6-1, con sovrapposta la route della tubazione.

Sulla base dei risultati ottenuti si osserva come la pendenza media si mantenga su valori estremamente contenuti ( $0^\circ - 6^\circ$ ) per larga parte dell'area attraversata. Eventuali situazioni locali (con pendenze massime nell'intervallo  $24^\circ - 27^\circ$ ) risultano comunque a distanze superiori a 500 m dal passaggio della tubazione.

Pertanto, è ragionevole concludere come l'assetto del sito di progetto in termini geomorfologici, geologici, geotecnici e di bassa sollecitazione sismica non suggerisca la potenziale insorgenza di fenomeni di instabilità generale in condizioni sismiche. Ulteriori possibili valutazioni potranno essere svolte per situazioni specifiche, ad una scala di maggiore dettaglio, in fase operativa.

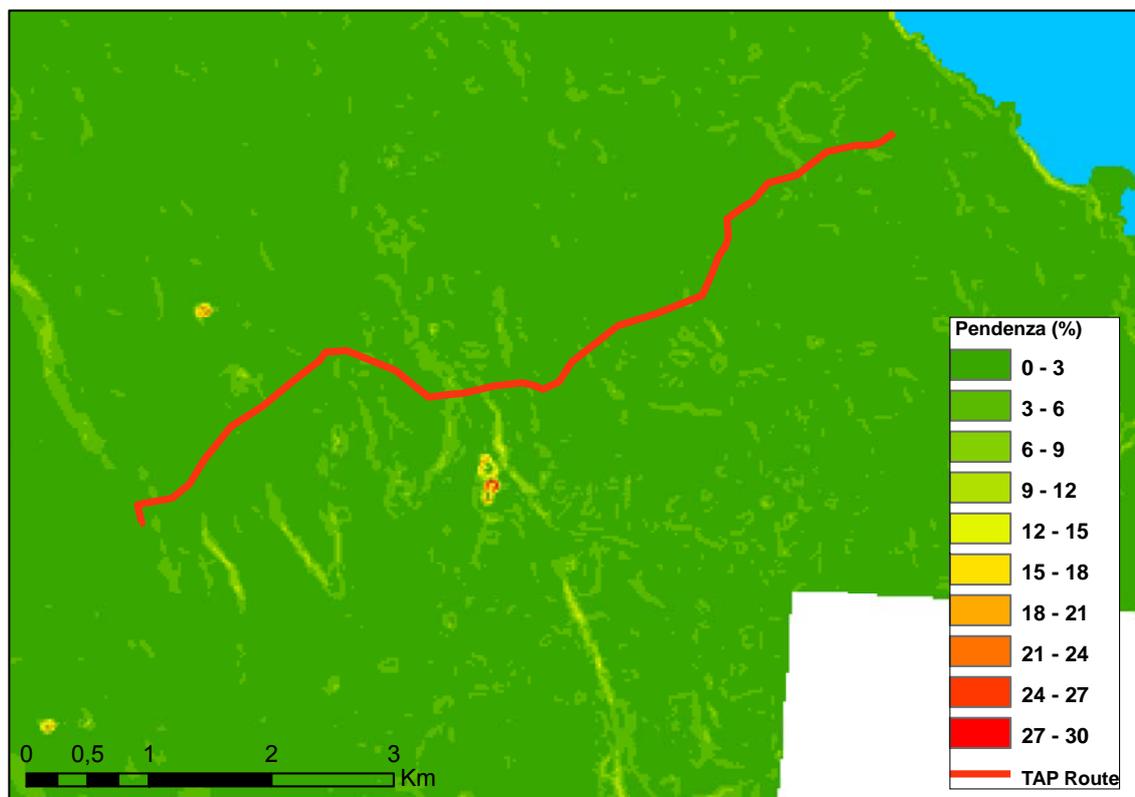


Figura 6-1: Pendenza del terreno attraversato dal tratto TAP Onshore Italia da DEM (downsampling a 24 m).