



Trans Adriatic
Pipeline

Revisionato dove indicato

TAP AG Project Title / Facility Name:
Trans Adriatic Pipeline Project

Document Title:
Prescrizione A18
Approdo Italiano – Analisi
Sismica del Microtunnel

saipem spa
Il Progettista
Dott. Ing. A. NAPOLITANO Iscritto all'Ordine
degli Ingegneri di Foggia al n. 2285
Tel. 0721-1482357 - Fax 0721-150919
P. e. C. IVA 00825790157

Rev/	Revision Date (dd-mm-yyyy)	Reason for issue and Abbreviation for it		Prepared by	Checked by	Approved by
1	11/01/2017	Emissione per Costruzione	IFC	Romiti	Napolitano	Zenobi
00	19/11/2015	Emissione per Approvazione	IFA	Onori	Napolitano	Zenobi
0A	18/09/2015	Emissione per Revisione	IFR	Onori	Napolitano	Badalini
A	12/09/2015	Issued for IDC	IR	Onori	Marchionni	Badalini

	Contractor Name:	SAIPEM
	Contractor Project No/:	022720
	Contractor Doc/ No/:	01-LA-E-80019
	Tag No's/:	

TAP AG Contract No/: C14758	Project No/: 022720	
PO No/:	RD Code:	Page: 1 of 98

TAP AG Document No/:

OPL00-SPF-200-G-TRX-0017

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	2 of 98

INDICE

1	INTRODUZIONE	4
1.1	Descrizione del Progetto TAP	4
1.2	Descrizione della condotta nel tratto italiano	4
2	DEFINIZIONI E ABBREVIAZIONI	6
2.1	Definizioni	6
2.2	Abbreviazioni	6
3	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	7
3.1	Normative e standard	7
3.2	Riferimenti	7
3.3	Documenti di Progetto	8
4	SCOPO DEL DOCUMENTO	9
5	CARATTERISTICHE DEL MICROTUNNEL	10
5.1	Caratteristiche principali e configurazione geometrica del microtunnel	10
5.2	Caratteristiche dei tubi prefabbricati in calcestruzzo armato	13
6	SOMMARIO E CONCLUSIONI	15
7	CARATTERIZZAZIONE DELLA SISMICITÀ	17
7.1	Inquadramento geologico strutturale	17
7.2	Sismicità storica	19
7.3	Caratterizzazione sismogenetica	21
7.4	Caratterizzazione della sismicità	28
8	PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE	30
8.1	Risposta sismica locale	32
8.1.1	Caratterizzazione del sottosuolo	32
8.1.2	Condizioni topografiche	35
8.2	Accelerazione orizzontale in superficie	36
8.3	Velocità orizzontale delle onde sismiche in superficie	36
9	VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE	38
9.1	Analisi delle prove sismiche in foro (Downhole)	40
9.2	Analisi dei sondaggi a carotaggio continuo (Borehole)	42

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	3 of 98

9.3	Risultati delle verifiche a liquefazione	47
10	VERIFICA DEL POTENZIALE DI FRANA INDOTTA DA SISMA	48
10.1	Scopo della verifica	48
10.2	Metodologia di verifica	48
10.3	Software utilizzato	49
10.4	Quadro geomorfologico dell'area	49
10.5	Dati stratigrafici	49
10.6	Caratterizzazione geotecnica dei terreni	50
10.7	Modello geometrico	52
10.8	Carico sismico	53
10.9	Risultati dell'analisi di stabilità	53
11	VERIFICA DELLA RISPOSTA DEL MICROTUNNEL ALLO SCUOTIMENTO	61
11.1	Generalità	61
11.1.1	Il moto sismico nel terreno	61
11.1.2	Deformazioni sul tunnel	64
11.1.3	Risposta del tunnel alle deformazioni del terreno	64
11.2	Verifica delle deformazioni nella configurazione di compressione	65
11.2.1	Metodo "Free Field"	65
11.2.2	Metodo "soil - tunnel interaction"	67
11.3	Verifica a deformazione nella configurazione di trazione	72
11.4	Deformazioni trasversali e interazione dello shaking con il gasdotto	73
11.4.1	Spostamento trasversale del giunto per effetto dello shaking	73
11.4.2	Interazione con il gasdotto	74
12	REVISION RECORD	75
13	APPENDICE 1 - ELABORATI GRAFICI RIPORTATI FUORI SCALA NELLA RELAZIONE	76

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	4 of 98

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 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.

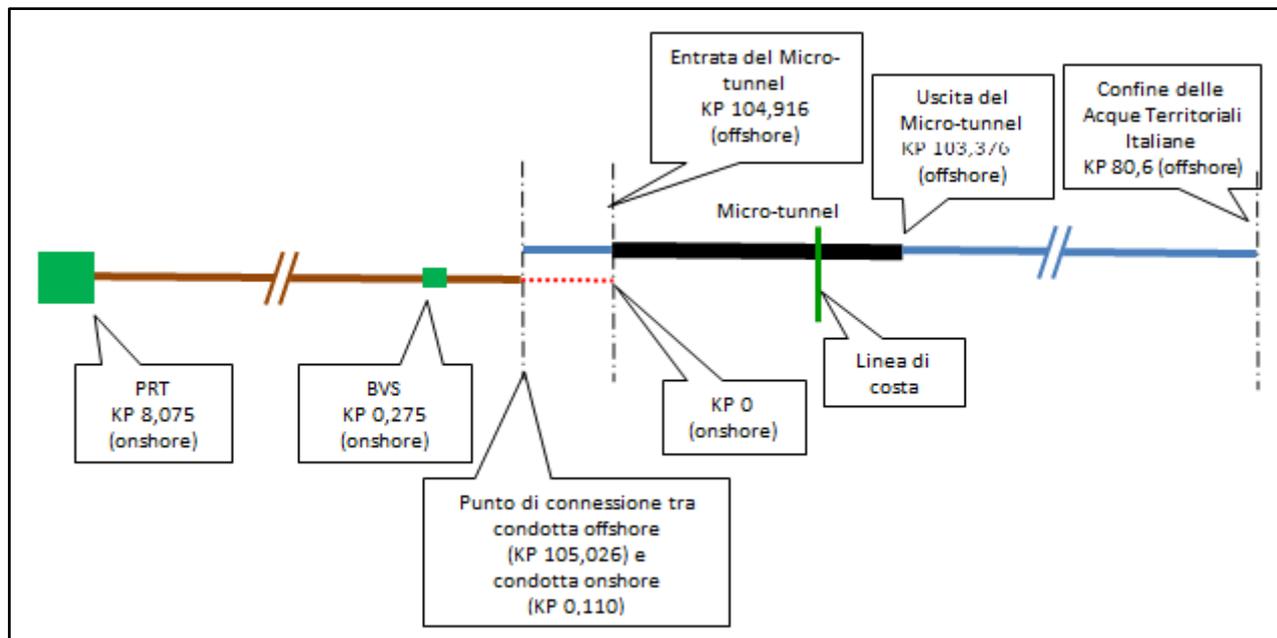


Figura 1-1: Trans Adriatic Pipeline – Visione d'insieme

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	5 of 98

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

- 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);
- 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;
- 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).

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).

Per le caratteristiche di progetto del microtunnel e del pozzo di trivellazione si rimanda agli elaborati grafici elencati in Sezione 3.3.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	6 of 98

2 DEFINIZIONI E ABBREVIAZIONI

2.1 Definizioni

Company	TAP AG
Contraente	Saipem S.p.A
Progetto	TRANS ADRIATIC PIPELINE PROJECT Offshore Pipeline Detail Design

2.2 Abbreviazioni

HSE	Salute, sicurezza e ambiente
MT	Microtunnel
KP	Punto chilometrico
SSI	Stazione di spinta intermedia
TAP	Trans Adriatic Pipeline
TBM	Macchina a scudo fresante
WD	Profondità

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	7 of 98

3 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.

3.1 Normative e standard

- /1/ DNV-OS-F101, Submarine Pipeline System, Agosto 2012
- /2/ Decreto del Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008: "Nuove norme tecniche per le costruzioni" (NTC 2008).
- /3/ Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, 223 del 11 settembre 2014
- /4/ Deliberazione della Giunta Regionale n. 153 del 2 marzo 2004: "L.R. 20/00 - O.P.C.M. 3274/03 – Individuazione delle zone sismiche del territorio regionale e delle tipologie di edifici ed opere strategici e rilevanti - Approvazione del programma temporale e delle indicazioni per le verifiche tecniche da effettuarsi sugli stessi."
- /5/ A125E ATV Pipe jacking and related techniques.

3.2 Riferimenti

- /6/ A. Argnani, F. Frugoni, R. Cosi, M. Ligi and P. Favali, "Tectonics and Seismicity of the Apulian Ridge South of Salento Peninsula (Southern Italy)," Annals of Geophysics, Vol. 44, No. 3, 2001, pp. 527-540.
- /7/ P. Galli and G. Naso, "The 'Taranta' Effect of the 1743 Earthquake in Salento (Apulia, Southern Italy)," Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata, Vol. 49, No. 2, 2008, pp. 177-204.
- /8/ R. Gambini and M. Tozzi, "Tertiary Geodynamic Evolution of Southern Adria Microplate," Terra Nova, Vol. 8, No. 6, 1996, pp. 593-602.
- /9/ Meletti C., Valensise G.; 2004: Zonazione sismogenetica ZS9 – App.2 al Rapporto Conclusivo. In: Gruppo di Lavoro MPS (2004). Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM 3274 del 20 marzo 2003. Rapporto Conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile, INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp. + 5 allegati.
- /10/ P. Pierri et alii. "Analysis of the Low-Energy Seismic activity in the Southern Apulia (Italy)" Open Journal of Earthquake Research, Vol. 2, 2013, pp.91-105
- /11/ D. Slejko, et alii. "Seismic Hazard Assessment for Adria," Annals of Geophysics, Vol. 42, No. 6, 1999, pp. 1085- 1107
- /12/ Youd, T. L., et al. (2001) "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils." J. Geotech. Geoenviron. Eng., ASCE, 127(10), 817–833.
- /13/ Boulanger, R. W. and Idriss, I. M. (2004). "State normalization of penetration resistances and the effect of overburden stress on liquefaction resistance", in Proceedings of 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	8 of 98

Engineering, and 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, D. Doolin et al., eds., Stallion Press, Vol. 2, pp. 484–91

- /14/ Iwasaki, T., Tatsuoka F., Tokida K., and Yasuda S. (1978). A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan, in 2nd International conference on microzonation, San Francisco, p. 885-896
- /15/ Hashash, et al, *Seismic design and analysis of underground structures*, Tunnelling and Underground Space Technology, 2001.
- /16/ Kuribayashi, E., Iwasaki, T., and Kawashima, K., *Dynamic Behaviour of A Subsurface Tubular Structure*, Proceedings of 5th Symposium on Earthquake Engineering, India, 1974.
- /17/ Newmark, N.M.,. *Problems in wave propagation in soil and rock*. Proceedings of the International Symposium on Wave Propagation and Dynamic Properties of Earth Materials, 1968.
- /18/ Owen, G. N., and Scholl, R. E., *Earthquake Engineering of Large Underground Structures*, prepared for the Federal Highway Administration, FHWA/RD-80/195, 1981.
- /19/ St. John, C. M., and Zahrah, T. F., *Aseismic Design of Underground Structures*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 2, No. 2, 1987.
- /20/ Wang, J.-N., *Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach*, Monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New York. 1993.

3.3 Documenti di Progetto

- | | | |
|------|------------------------------------|--|
| /21/ | OPL00-SPF-150-G-TRB-0001-03 | Dati Base del progetto |
| /22/ | OPL00-SPF-200-G-DXA-0013-01 | Approdo italiano - Planimetria generale |
| /23/ | OPL00-SPF-200-Q-DQP-0001-01 | Profilo e Planimetria di installazione del microtunnel |
| /24/ | OPL00-SPF-200-G-DXA-0015-00 | Approdo italiano - Disposizione gasdotto in tubo di protezione |
| /25/ | OPL00-DAP-160-Y-TRE-0006-00 | Survey Report - Geophysical Survey, Italian Landfall |
| /26/ | IPL00-URS-000-Q-TRG-0002-0A | Geotechnical & Geophysical report – Microtunnel (Italy) |
| /27/ | OPL00-SPF-150-Y-TRD-005_00 | Seismic Site Response Analysis Report |

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	9 of 98

4 SCOPO DEL DOCUMENTO

Relativamente al microtunnel e al pozzo di trivellazione nei quali verranno alloggiati il metanodotto e il cavo a fibre ottiche, lo scopo del presente documento è quello di verificare:

- il potenziale di liquefazione
- il potenziale di frana indotta da sisma
- la risposta del microtunnel allo scuotimento

Tali verifiche sono effettuate sulla base delle seguenti caratteristiche sismiche dell'area:

- sismicità
- pericolosità sismica di base
- risposta Sismica Locale.

Il presente documento è stato preparato per ottemperare alle prescrizioni contenute nel Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, n. 223 del 11 Settembre 2014 (Rif. /3/).

In particolare riguardo alla sismicità, al punto n.18 viene richiesto:

a) Allo scopo di ridurre la vulnerabilità della condotta in caso di sisma:

tenuto conto della lunghezza del tracciato e della varietà delle condizioni topografiche e di suolo che si riscontrano lungo esso, dovrà essere effettuato uno studio approfondito sulla risposta sismica locale dell'opera, sulla base di parametri che scaturiscano da specifiche indagini geofisiche, sismiche e litologiche di dettaglio; lo studio dovrà includere la descrizione dettagliata del moto e delle accelerazioni del suolo, del materiale di riempimento e del substrato, anche in condizioni di saturazione, e dovrà determinare le dimensioni ottimali della trincea di scavo e della granulometria del materiale di riempimento; per la condotta venga utilizzato uno spessore tale da garantire il coefficiente di sicurezza massimo anche in tutti i versanti con rischio di frana e negli attraversamenti in genere.

b) La progettazione esecutiva del PRT e del pozzo di spinta necessario all'esecuzione del microtunnel all'approdo costiero, dovrà essere effettuata compatibilmente con le normative tecniche vigenti relative alle costruzioni in zone sismiche e dovrà essere accertato che le fondazioni di tipo superficiale diretto per le opere da realizzare non potranno essere interessate dalle oscillazioni del livello di falda.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	10 of 98

5 CARATTERISTICHE DEL MICROTUNNEL

5.1 Caratteristiche principali e configurazione geometrica del microtunnel

Il microtunnel previsto per l'approdo italiano del Gasdotto TAP, sarà realizzato con la tecnica del "pipe jacking", che consiste sostanzialmente nello spingere conci cilindrici di cemento armato appositamente progettati per questa funzione, all'interno del foro precedentemente scavato da una fresa scudata, nel sottosuolo lungo l'asse prestabilito dal progetto sino al punto di uscita previsto lato mare ad est della spiaggia di San Foca.

All'inizio dei lavori di drilling, la testa di perforazione (TBM) verrà alloggiata in un "pozzo di spinta", di dimensioni adeguate alle operazioni di trivellazione richieste, di tipologia costruttiva adeguata per consentire la tenuta idraulica nei confronti della filtrazione di acque.

Il microtunnel in oggetto è progettato per essere realizzato sotto falda; il tunnel sarà completamente impermeabilizzato durante tutte le sue fasi costruttive adottando una postazione di trivellazione a tenuta idraulica, una fresa "a bilanciamento" delle pressioni idrostatiche esterne e giunti di tenuta idraulica tra gli elementi tubolari posati.

La definizione dell'asse, la dimensione e la geometria del microtunnel sono definite nel disegno (Rif. /23/). Di seguito sono descritte le principali caratteristiche di progetto.

La tecnologia trenchless di trivellazione è stata selezionata in progetto con lo scopo di evitare le interferenze con l'ambiente di superficie e del fondo marino nella fascia costiera interessata da lavori. L'utilizzo di un microtunnel in cui alloggiare il metanodotto e il cavo a fibre ottiche consente inoltre, di sottopassare anche la strada provinciale SP n. 366, lungo il percorso a terra, senza la necessità di aprire una trincea di scavo per realizzare l'attraversamento.

L'orientamento dell'asse del microtunnel e il suo punto di uscita sono stati selezionati per soddisfare le limitazioni imposte dai vincoli esistenti e per rendere minimi i potenziali impatti sull'ambiente, in particolare per quanto riguarda:

- la presenza lungo la linea di costa delle aree PAI (Piano per l'Assetto Idrogeologico) a pericolosità geomorfologica molto elevata (P.G.3), la cui ubicazione è riportata in Figura 5-1.
- la presenza della flora marina protetta nel tratto a mare. Il punto di uscita del microtunnel è stato definito in modo da evitare l'interferenza con la flora marina protetta e, in particolare, di non creare disturbo alle praterie Fanerogame presenti sul fondale, la cui ubicazione è riportata in Figura 5-1.
- la necessità di non avere impatto di lavori di costruzione sulla spiaggia e nelle aree limitrofe.

La lunghezza del tunnel è di **1540 m**, il diametro interno previsto è di 2,4 m. Lo spessore dei conci è determinato dall'entità delle spinte, dai carichi esterni e dalla tipologia di opera che prevede il recupero della fresa a mare. Lo spessore di progetto dei conci prefabbricati è di 30 cm, determinando quindi il diametro esterno del microtunnel pari a 3,0 m (vedi Figura 5-2 e Figura 5-3).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	11 of 98



Figura 5-1: Planimetria microtunnel

Per ottenere una copertura di sicurezza, la profondità del tunnel è stata fissata in modo tale da avere nel punto finale offshore, un'altezza residua di sedimento marino pari a 3,5 m, che consente un adeguato contrasto al galleggiamento.

La geometria verticale del tunnel che raccorda il punto di partenza a terra a quota di 8 m con l'uscita a mare a quota -28 m, è definita in modo da ottenere una transizione molto graduale della struttura che consenta, nella fase di tiro e varo della condotta trascinata lungo il fondo del MT, di evitare brusche sollecitazioni meccaniche di piegatura; per questa ragione il raggio di curvatura è stato previsto pari a 6000 m. Un raggio di curvatura così elevato consente anche una migliore efficienza dei giunti di connessione tra i conci del microtunnel.

Il raggio di curvatura del microtunnel è determinato in modo che la condotta possa adagiarsi sul fondo grazie al suo peso proprio. infatti, nella fase di tiro, durante l'installazione, le forze in gioco sono il peso proprio della condotta in acqua e l'attrito della condotta sul fondo del microtunnel.

La configurazione di progetto dell'approdo è indicata in Figura 5-2. Le caratteristiche principali sono di seguito riassunte:

- la lunghezza del tunnel è di 1.540 m
- il diametro interno richiesto è di 2,4 m, lo spessore della parete del concio pari a 30 cm è stato predimensionato per sopportare le sollecitazioni previste, pertanto il diametro esterno è di 3,0 m.
- il battente d'acqua all'uscita del MT è di 28 m
- La pendenza al punto di ingresso è di circa $3^{\circ}53'$
- il raggio di curvatura è di 6.000 m
- la pendenza al punto di uscita del MT è quasi orizzontale ($-0^{\circ} 33' 14''$)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	12 of 98

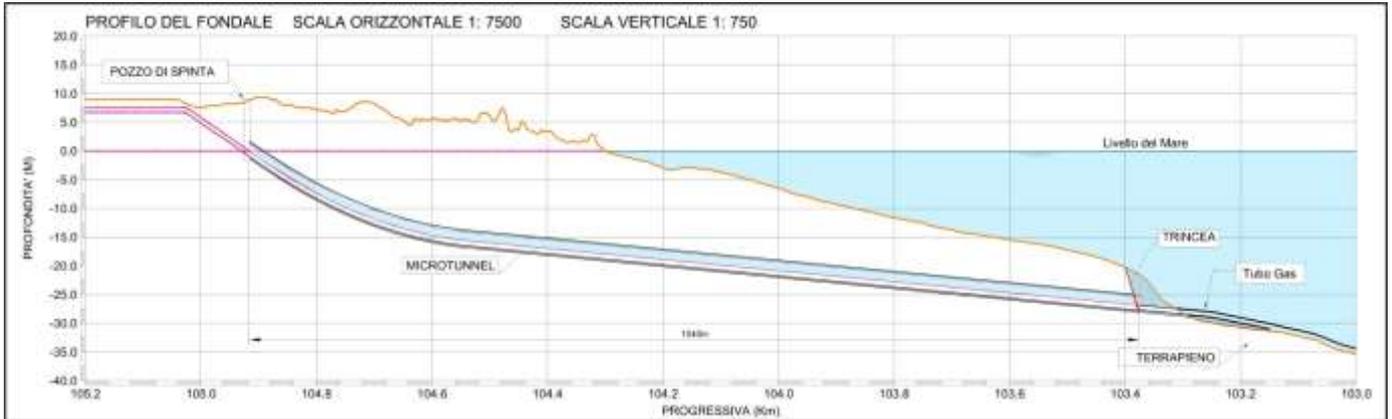


Figura 5-2: Profilo longitudinale del Microtunnel di approdo

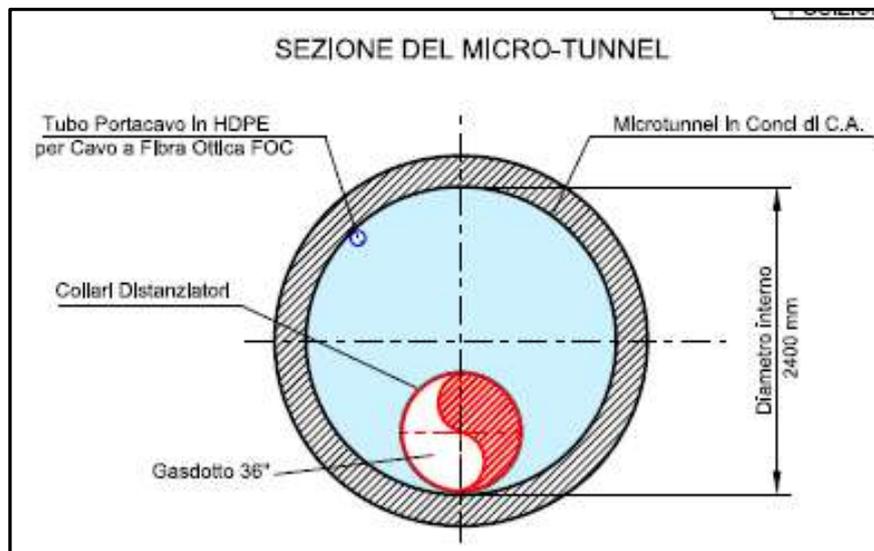


Figura 5-3: Sezione trasversale del Microtunnel

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	13 of 98

5.2 Caratteristiche dei tubi prefabbricati in calcestruzzo armato

I tubi prefabbricati in c.a. saranno prodotti in conformità con la normativa A125E ATV standard Rif. /5/. Questo standard è usato per questo tipo specifico di conci in c.a. che sono installati nel terreno mediante inserimento diretto con spinta assiale. La normativa citata definisce le tolleranze di fabbricazione, così come le qualifiche per cemento armato e acciaio utilizzato per la loro fabbricazione.

Le caratteristiche dei conci che saranno utilizzati per il microtunnel costiero di approdo del gasdotto TAP, sono le seguenti:

peso specifico del calcestruzzo armato	$\gamma_t = 25 \text{ kN/m}^3$
diametro esterno	$D = 3000 \text{ mm}$
spessore	$t = 300 \text{ mm}$
diametro interno	$D_i = 2400 \text{ mm}$
lunghezza di ogni concio	$L = 2320 \text{ mm}$

I conci di rivestimento in c.a. che dovranno essere impiegati, sono anelli prefabbricati in conglomerato cementizio armato. In considerazione degli elevati standard di qualità richiesti, i manufatti in c.a. saranno forniti da produttori qualificati per questo tipo di materiali, saranno quindi prodotti in stabilimento di prefabbricazione con qualità e caratteristiche controllate e certificate e presenteranno resistenze garantite per le massime sollecitazioni prevedibili. Sono pre-dimensionati per resistere all'elevata spinta assiale (conferita dal sistema di avanzamento) e verificati per i carichi litostatici del terreno, sia durante le fasi di avanzamento della trivellazione, sia a lungo termine, garantendo così la stabilità dell'opera nel tempo.

Le giunzioni tra i tubi di rivestimento saranno di tipologia idonea per consentire la deviazione angolare del tunnel e la sua tenuta idraulica; l'incastro e il centraggio tra due tubi successivi saranno garantiti mediante opportuna sagomatura dei bordi e con collari in acciaio annegati nel getto, la tenuta idraulica del giunto sarà assicurata da anelli in gomma.

Il giunto di tenuta idraulica tra due tubi contigui è costituito da materiale elastometrico la cui tenuta e i particolari del suo alloggiamento sono dimensionati in modo tale che, una volta posizionati, siano compressi evitando che siano superati i livelli di resistenza del materiale.

Sono previsti ugelli sui conci in calcestruzzo al fine di iniettare fanghi di perforazione (bentonite e/o polimeri per la lubrificazione) dall'interno del cavo sulla superficie di scorrimento dei conci ove si rendesse necessario.

Tali iniezioni di lubrificante bentonitico o polimerico sono delle misure cautelative e vengono eseguite solo quando necessario per l'ottimizzazione del progresso della spinta, in ogni caso, rimangono confinate nella sottile intercapedine tra foro trivellato e concio inserito e non sono disperse nell'ambiente circostante.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	14 of 98



Figura 5-4: -Installazione conci

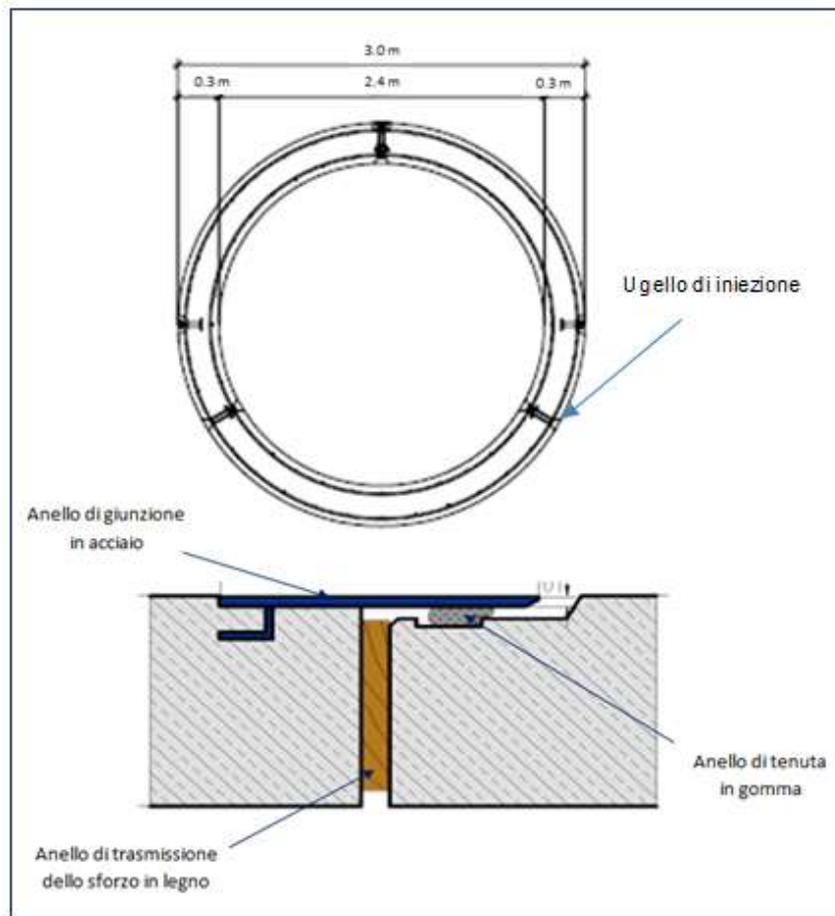


Figura 5-5: Sistema di tenuta conci in calcestruzzo e ugelli di lubrificazione

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	15 of 98

6 SOMMARIO E CONCLUSIONI

Il presente documento è stato preparato per ottemperare alle prescrizioni contenute nel Decreto del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare, n. 223 del 11 Settembre 2014 (Rif. /3/).

Relativamente all'area interessata dal pozzo di spinta e dal microtunnel, sono stati affrontati i seguenti argomenti:

Caratterizzazione della Sismicità e Pericolosità sismica di base

La distribuzione e l'entità dei terremoti storici nell'area di interesse (estratti dal catalogo CPTI11) dimostra che la zona in studio è caratterizzata da un indice di sismicità molto basso, sia dal punto di vista della frequenza di eventi che degli effetti registrati.

Dall'analisi della banca dati DISS 3.2, è stato verificato che l'area in studio non interessa sorgenti sismogenetiche.

Risposta Sismica Locale

La valutazione della sismicità dell'area è stata eseguita, in accordo alla normativa italiana ed internazionale, analizzando il moto sismico nel suo propagarsi dal sottosuolo (bedrock) verso la superficie libera.

I valori di accelerazione massima al suolo ottenuti per lo Stato Limite del Danno (SLD con tempi di ritorno di 201 anni) e per lo Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV con tempi di ritorno di 1898) anni sono, rispettivamente, pari a 0,042 e 0,112 g.

I valori di velocità orizzontale delle onde sismiche in superficie, relativa agli stessi Stati Limite, sono pari a 0,028 e 0,114 m/s.

Verifica del potenziale di liquefazione

Sono state effettuate le verifiche alla liquefazione utilizzando i dati provenienti dalle prove sismiche in foro e dai sondaggi a carotaggio continuo disponibili. I risultati mostrano che i terreni attraversati, sottoposti alle azioni sismiche di progetto, non sono suscettibili a liquefazione. In particolare, l'indice di liquefazione, calcolato in accordo con la formula proposta da Iwasaki (Rif. /14/) è uguale a 0 per tutte le verticali esaminate, sia utilizzando i valori di accelerazione calcolati in base alla normativa italiana (Rif. /2/), sia quelli calcolati per lo studio sismico offshore (Rif. /27/), che considera un sisma con tempi di ritorno di 10000 anni.

Verifica del potenziale di frana indotta da sisma

L'analisi di stabilità del versante in asse trivellazione, in presenza delle sollecitazioni sismiche, è stata effettuata con differenti metodi di calcolo valutando il fattore di sicurezza minimo tra le numerose superfici circolari di potenziale scorrimento analizzate. I valori dei coefficienti di sicurezza che variano tra 2,2 ed oltre 7 mostrano la sostanziale stabilità del versante lungo tutto l'asse del microtunnel in progetto con margini di sicurezza sempre superiori al 200% anche in condizioni sismiche.

Anche le verifiche eseguite considerando situazioni sismiche estreme (TR = 10000 anni) confermano margini di sicurezza attorno al 200%.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	16 of 98

Verifica della risposta del microtunnel allo shaking

Sono stati presentati i metodi con cui sono state determinate le massime deformazioni del microtunnel in conseguenza al moto del terreno in presenza delle sollecitazioni sismiche.

L'intensità del movimento del terreno dovuto al terremoto è stato descritto principalmente tramite il PGV (peak ground velocity), PGA (peak ground acceleration) e Vs (velocità effettiva dell'onda sismica nella sua direzione di propagazione).

Con i due metodi "free field" e "soil tunnel interaction" sono state calcolate le deformazioni nel calcestruzzo del tubo di protezione nella condizione di sollecitazione sismica di compressione. In entrambi i casi le caratteristiche di deformabilità ammissibile nel calcestruzzo risultano di valore superiore alle deformazioni indotte dal sisma sul terreno.

Analogamente è stata effettuata, con esito positivo, la verifica a deformazione del giunto nella condizione di sollecitazione sismica a trazione.

Con l'ipotesi di trascurare le forze attritive che si esercitano sul piano trasversale al giunto, lo spostamento massimo assiale dei conci nella sezione giuntata per effetto dello scuotimento sismico risulta di **0,3 mm**, mentre lo spostamento trasversale è di **0,2 mm**. In entrambi i casi, tali spostamenti non pregiudicano l'integrità della struttura in c.a.

La verifica è stata effettuata anche con riferimento allo studio sismico della parte offshore (Rif. /27/), che considera un sisma con tempi di ritorno di 10000 anni. Anche in queste condizioni sismiche estreme, i valori di spostamento assiale e trasversale ottenuti, pari rispettivamente a **0,6 e 0,5 mm**, non sono tali da pregiudicare l'integrità del giunto e, quindi, del tunnel in progetto.

Interazione del gasdotto con le deformazioni per effetto dello shaking

Nella configurazione finale il microtunnel verrà riempito con acqua marina, pertanto, il gasdotto essendo libero di deformarsi, non interagisce con i potenziali spostamenti trasversali della struttura in c.a. fino al valore di circa 1400 mm. Pertanto le deformazioni sul rivestimento in c.a. causate dallo shaking non hanno alcuna ripercussione sulla configurazione di deformazione del gasdotto.

In sintesi, le analisi eseguite hanno consentito di verificare che gli effetti transitori (shaking) dovuti all'azione del sisma sono trascurabili mentre quelli permanenti (frane sismo-indotte e liquefazione) sono assenti.

I risultati ottenuti, quindi, stabiliscono che la sismicità dell'area non costituisce una fonte di pericolo per la realizzazione del microtunnel in progetto e conseguentemente per il gasdotto la cui installazione è prevista al suo interno.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	17 of 98

7 CARATTERIZZAZIONE DELLA SISMICITÀ

7.1 Inquadramento geologico strutturale

L'area di studio è ubicata nella parte meridionale della Regione Puglia, che si estende tra il Mar Ionio e il Mare Adriatico (vedi Figura 7-1). Questa regione costituisce la parte emersa della Piattaforma Apula (Adria) e rappresenta il settore di avampaese (Avampaese Apulo) che si estende tra le catene orogenetiche sud- appenniniche (ad Ovest) e Dinariche (ad Est).

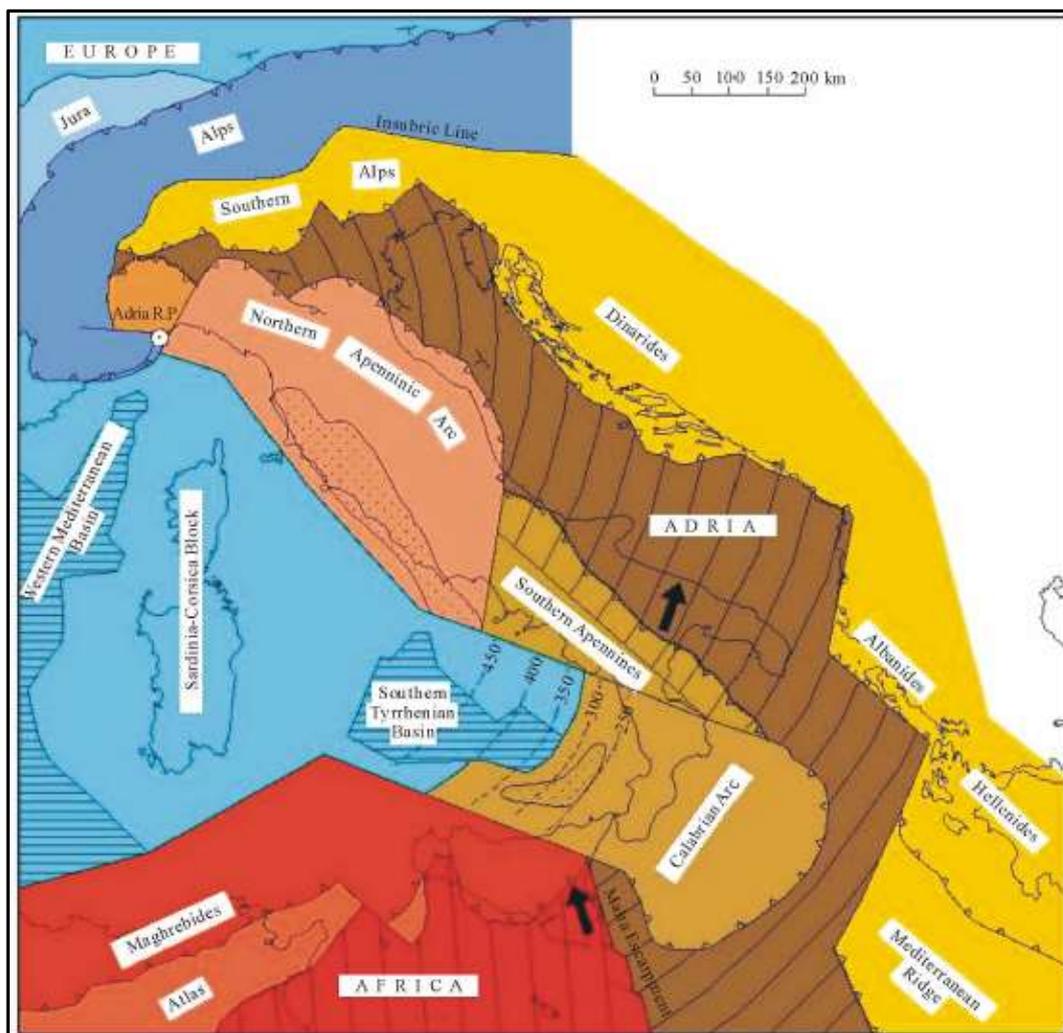


Figura 7-1: Schema strutturale d'Italia e zone circostanti: Le frecce nere indicano i vettori di slittamento dell'Africa contro l'Europa e di Adria vs Europa ottenute dai dati geodetici. Adria RP è il polo di rotazione di Adria (da Pierrì P. e Alij, 2013).

L'Avampaese Apulo è costituito da un basamento ercinico ricoperto da una sequenza calcarea mesozoica di 3-5 km di spessore e da sottili coperture di età terziaria e quaternaria. Esso risulta debolmente deformato e suddiviso da faglie ad andamento appenninico e sub-appenninico in cinque blocchi strutturali con diverso tasso di sollevamento: il Gargano, il Tavoliere, le Murge, la Pianura tarantino-brindisina e la Penisola Salentina.

In particolare la Penisola Salentina e le Murge sono separate dall'ampia depressione che si estende tra Taranto e Brindisi che costituisce la cosiddetta "Soglia Messapica" delimitata da scarpate ad orientazione prevalente E-W; la relazione tra Salento e Murge è complicata dai loro movimenti di rotazione differenziati e da movimenti di tipo trascorrente localizzati in

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	18 of 98

corrispondenza dei limiti tettonici della Penisola Salentina che costituiscono la “North e South Salento Fault Zone” (vedi Figura 7-2 a) secondo Gambini e Tozzi (Rif. /8/).

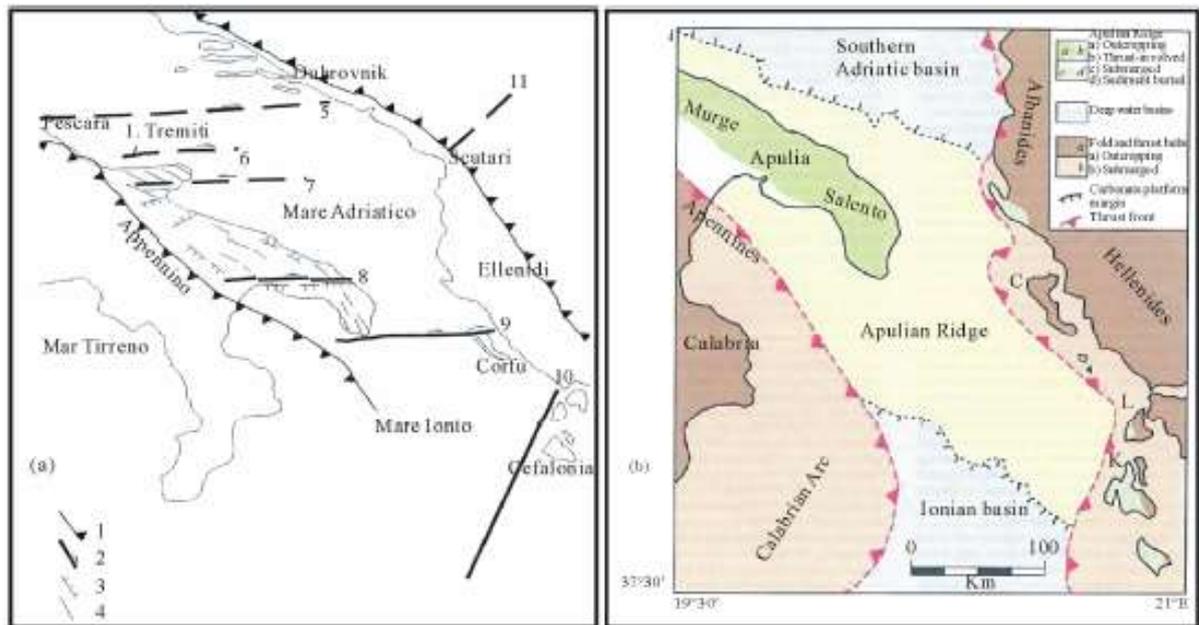


Figura 7-2: (a) Schema strutturale dell' Avampaese Apulo (Gambini e Tozzi, 1996): 1) Fronte dell'Arco Calabro esterno; 2) principali faglie trascorrenti (le frecce indicano il verso del movimento); 3) principali faglie distensive; 4) altri allineamenti di faglie; 5) Faglia Pescara-Dubrovnik; 6) faglia Tremiti; 7) faglia Mattinata; 8) faglia Nord-salentina; 9) faglia Sud-Salentina; 10) faglia Cefalonia; 11) faglia Scutari. (b) Assetto geologico-strutturale dell'area (Argnani A. et alii, 2001 [16]): "Apulian Ridge" rappresenta l'avampaese delle catene a pieghe e faglie degli Appennini e delle Ellenidi. Con C, L e K sono indicate le isole di Corfù, Leucade e Cefalonia.

Faglie normali, con orientazione NW-SE, quindi trasversali alle faglie trascorrenti che delimitano a N e S il blocco strutturale salentino, sono presenti nella Penisola Salentina, che costituisce la parte emersa dell' "Apulian Ridge o Swell" (vedi Figura 7-2 b; Rif. /6/). L' "Apulian Ridge o Swell" è l'elemento morfologico che separa il bacino ionico dal meno profondo bacino adriatico meridionale, che si estende dalla Penisola Salentina all'isola di Cefalonia (Rif. /10/).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	19 of 98

7.2 Sismicità storica

La sismicità storica dell'area in esame è stata analizzata consultando il Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani 2011 (CPTI11) redatto dal Gruppo di lavoro CPTI 2011 dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV).

La finestra cronologica coperta dal catalogo CPTI11 va dal 1000 d. C. circa a tutto il 2006, ed offre per ogni terremoto una stima il più possibile omogenea della localizzazione epicentrale (Latitudine, Longitudine), dei valori di Intensità massima ed epicentrale, della zona sorgente (ZS9), della magnitudo momento e della magnitudo calcolata dalle onde superficiali.

Per la compilazione del CPTI11 sono stati ritenuti di interesse solo i terremoti avvenuti in Italia e quelli che, pur essendo stati localizzati in aree limitrofe, potrebbero essere stati risentiti con intensità significativa all'interno dei confini dello stato.

Le seguenti figure mostrano la mappa delle localizzazioni dei terremoti storici presenti nel catalogo CPTI11. In particolare: la Figura 7-3 mostra la distribuzione dei terremoti nel periodo temporale compreso tra il 1000 d.C ed il 1899; la Figura 7-4 mostra quelli avvenuti tra il 1900 ed il 2006.

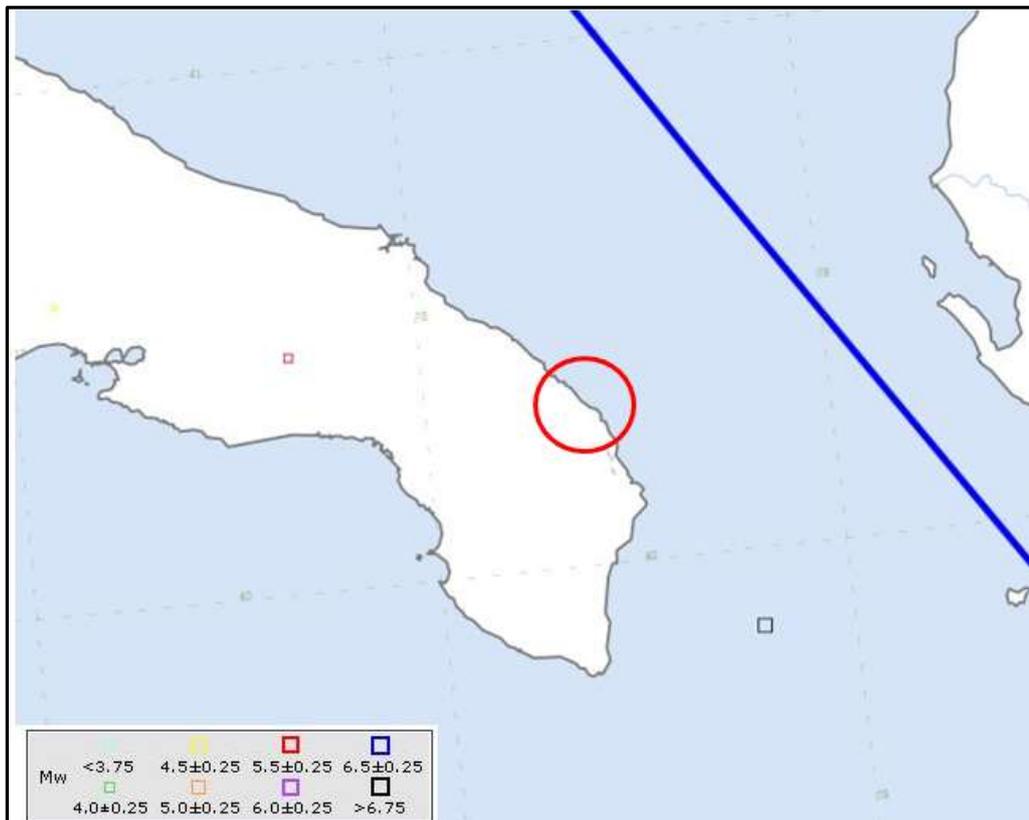


Figura 7-3: Mappa con la localizzazione degli epicentri dei terremoti storici italiani nel periodo 1000.d.C. - 1899 catalogati nel CPTI11 (INGV). Nel circolo è evidenziata l'area interessata dall'opera in progetto

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	20 of 98

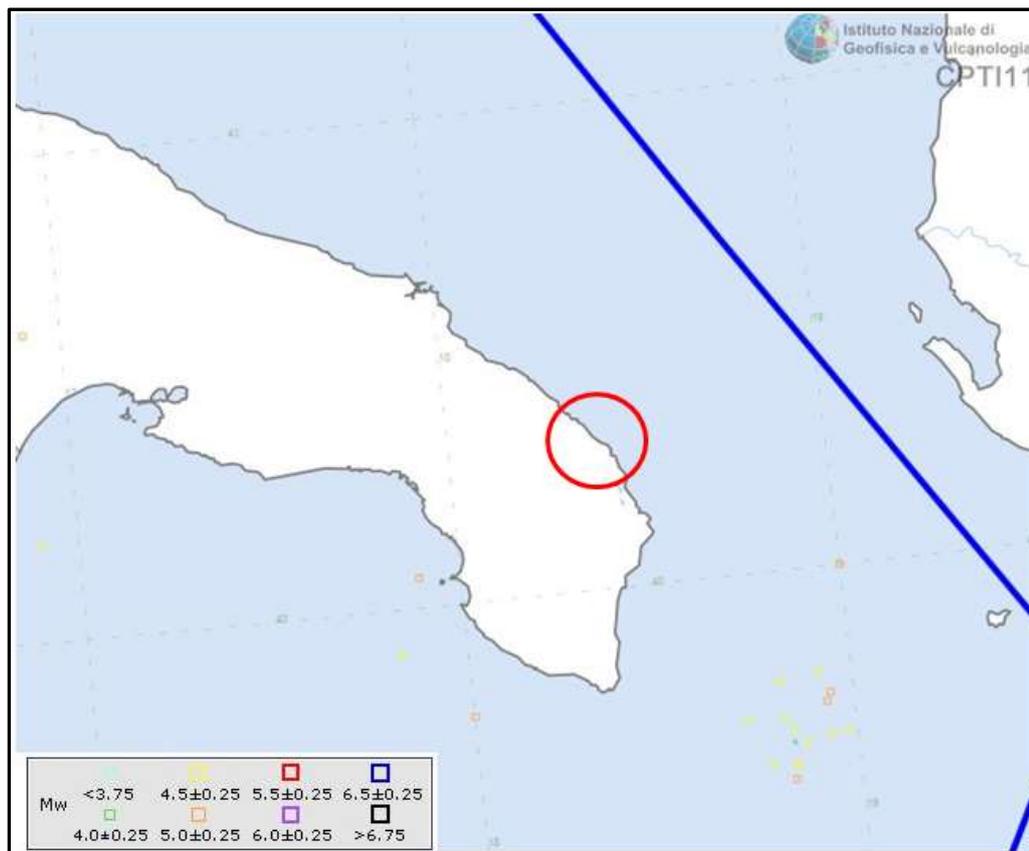


Figura 7-4: Mappa con la localizzazione degli epicentri dei terremoti storici italiani nel periodo 1900.d.C. - 2006 catalogati nel CPT111 (INGV). Nel circolo è evidenziata l'area interessata dall'opera in progetto

La storia sismica dell'area esaminata è stata desunta dal Database macrosismico dell'INGV DBMI11 che costituisce la base del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPT111) e riferita ai Comuni di Melendugno e Vernole. I maggiori eventi sismici che, in epoca storica, hanno interessato il territorio esaminato sono riassunti in *Tabella 7-1*.

Dalla lettura della tabella si evince che i massimi eventi sismici avvertiti nel territorio esaminato sono quelli verificatisi il 20 febbraio 1743, con epicentro nel basso Ionio, ed il 23 novembre 1980 con epicentro in Irpinia-Basilicata e caratterizzati rispettivamente da un'intensità del IX grado della scala MCS e da valori di magnitudo Mw 6,9-7,3 (stimata) e da un'intensità del X grado della scala MCS e da valori di magnitudo Mw 6,9.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	21 of 98

EFFETTI	IN OCCASIONE DEL TERREMOTO DEL:			
I[MCS]	Data	Ax	Io	Mw
F	20 02 1743	Basso Ionio	9	7.13 ±0.19*
NF	23 11 1980	Irpinia-Basilicata	10	6.89 ±0.09
NF	13 04 1988	Costa calabra	6-7	5.01 ±0.10
3	05 05 1990	Potentino		5.80 ±0.09
Legenda				
I[MCS]	Intensità (MCS)			
F	Avvertito (felt)			
NF	Non avvertito (Notfelt)			
Ax	Area dei maggiori effetti			
Io	Intensità epicentrale			
Mw	Magnitudo momento			
*	Dato non strumentale . Mw desunta			

Tabella 7-1: Eventi sismici i cui effetti si sono risentiti nel territorio interessato dall'opera in progetto. Da DBMI11 (INGV).

Gli epicentri dei terremoti più prossimi all'area in studio, censiti nel CPTI11, sono localizzati soprattutto nel Mar Ionio nel settore a sud-est della costa salentina (vedi Figura 7-4); di questi il terremoto di maggiore entità che ha avuto gravi effetti solo in alcuni centri salentini (Nardò e Leverano-LE, Francavilla Fontana-BR) è stato quello del 1743 (vedi Figura 7-3); questo terremoto è stato studiato nel dettaglio da Galli e Naso (Rif. /7/) secondo i quali i maggiori effetti del terremoto registrati in località (Nardò, Leverano, Francavilla Fontana) sono legati a fenomeni di amplificazione sismica essendo tali località ubicate su aree caratterizzate da spesse coperture sedimentarie pleistoceniche. L'unico terremoto con epicentro in Salento, riportato in CPTI11, è quello di Manduria (TA) del 1826 con l'intensità del VI-VII grado MCS e da valori di magnitudo Mw 5,36 (vedi Figura 7-3).

La distribuzione e l'entità dei terremoti storici nell'area di interesse estratti dal catalogo CPTI11 dimostra che la zona in studio è caratterizzata da un indice di sismicità molto basso, sia dal punto di vista della frequenza di eventi che degli effetti registrati.

7.3 Caratterizzazione sismogenetica

La caratterizzazione sismogenetica dell'area in studio è stata elaborata in base alla recente Zonazione Sismogenetica, denominata ZS9 (Rif. /9/) elaborata a cura dell' INGV ed alla consultazione del DISS, ("Database of Individual Seismogenic Sources), un database georiferito che racchiude la tettonica, le faglie e le informazioni paleo-sismiche al fine di caratterizzare al meglio le sorgenti sismogenetiche localizzate sul territorio nazionale, ambedue elaborate a cura dell' INGV.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	22 of 98

Zonazione Sismogenetica ZS9

Gli studi sulla pericolosità sismica condotti dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV) hanno portato alla definizione di una nuova zonazione sismogenetica del territorio italiano, denominata ZS9. Secondo questa zonazione il territorio nazionale è stato diviso in 36 zone-sorgente, individuate mediante l'osservazione delle caratteristiche della sismicità storica/attuale (massima magnitudo, frequenza degli eventi in catalogo, distribuzione nelle classi di magnitudo) e dallo studio delle geometrie delle sorgenti sismotettoniche.

Dall'analisi delle mappe di zonazione ZS9, il territorio considerato risulta esterno a zone sismogenetiche. La più prossima all'area è la zona 931 (vedi Figura 7-5)

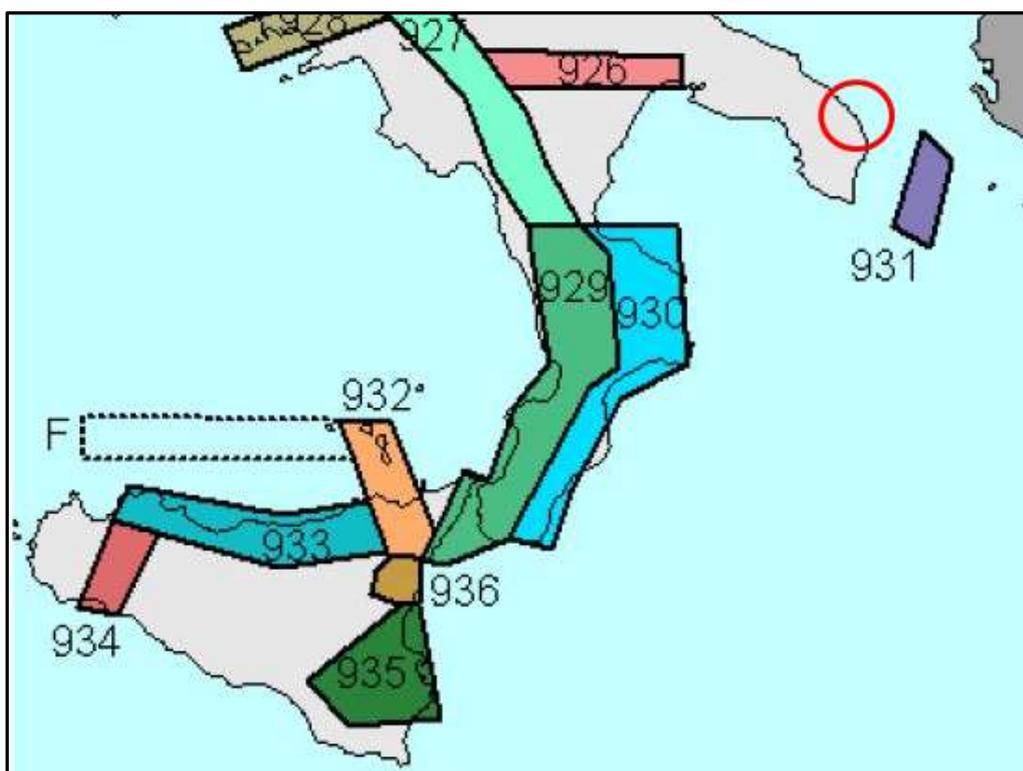


Figura 7-5: Zonazione sismogenetica ZS9 (modif. da Meletti C. e Valensise G., 2004). Nel circolo rosso è evidenziata l'area interessata dall'opera in progetto

La zona 931, legata al quadro cinematico dell'interazione tra la microplacca adriatica e la placca eurasiatica lungo i fronti compressivi delle strutture dinaridi ed ellenidi (Rif. /11/), è stata definita per rendere ragione della sismicità della Penisola Salentina che, in particolare, storicamente ha risentito del forte terremoto del 1743, localizzato in catalogo nel Mar Ionio a sud est delle coste salentine.

La zona sorgente è comunque mal definita dal punto di vista della sismicità.

Per ogni zona è stato definito uno strato sismogenetico e ad esso associata una "profondità efficace", ossia la profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti che determina la pericolosità sismica della zona (Rif. /9/).

Lo strato sismogenetico è stato definito come l'intervallo di profondità nel quale viene rilasciato il maggior numero di terremoti, ovvero l'intervallo in cui presumibilmente avverranno i prossimi eventi sismici. Questi strati sono stati definiti da un'analisi del catalogo della sismicità strumentale (1983-2002) dell'INGV e indicano l'intervallo di profondità che ha generato il 90% degli eventi storici che ricadono all'interno di ogni zona.

Per considerare le incertezze e il fatto che un unico valore di profondità può non essere rappresentativo dell'intero strato, è stata proposta una suddivisione dell'intero strato

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	23 of 98

sismogenetico in quattro classi di profondità comprese tra: 1-5 km, 5-8 km, 8-12 km, e 12-20 km. In *Figura 7-6* sono mostrate le classi di profondità efficace per ciascuna zona.

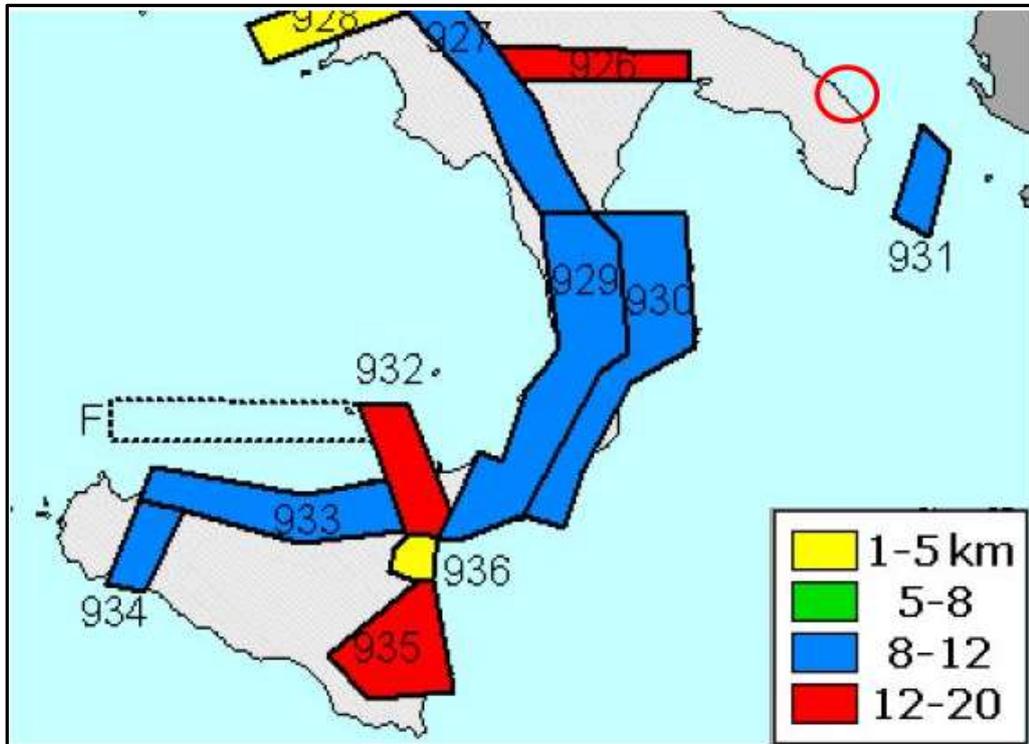


Figura 7-6: Classi di profondità efficace assegnate alle diverse zone sismogenetiche di ZS9 (da Meletti C. e Valensise G., 2004). Nel circolo rosso l'area in cui ricade l'opera in progetto.

La sismicità che caratterizza la zona 931, è relativamente profonda (8-12 km di profondità).

Nello studio di Meletti e Valensise (Rif. /9/) è stato indicato anche un meccanismo di fagliazione prevalente per ciascuna zona. Per meccanismo prevalente si intende quello che ha la massima probabilità di caratterizzare i futuri terremoti significativi. L'assegnazione è stata basata su una combinazione dei meccanismi focali osservati con dati geologici a varie scale e dai meccanismi focali dei terremoti significativi avvenuti in epoca strumentale tratti da un ampio e recente database nazionale. In *Figura 7-7* è mostrato uno stralcio della mappa nazionale, con in evidenza la zona interessata dall'opera in progetto.

La sismicità della zona 931 mostra caratteristiche di fagliazione di tipo "Faglia trascorrente".

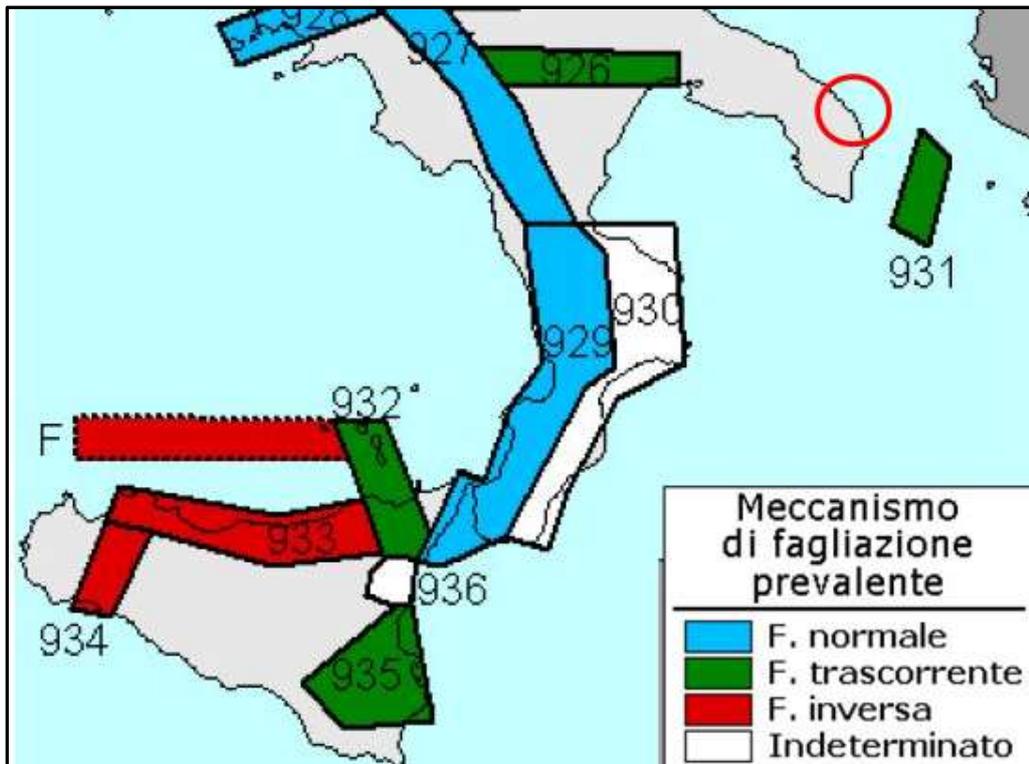


Figura 7-7: Meccanismo di fagliazione prevalente atteso per le diverse zone sismogenetiche di ZS9 (modif. da Meletti C. e Valensise G., 2004). Nel circolo l'area in cui ricade l'opera in progetto.

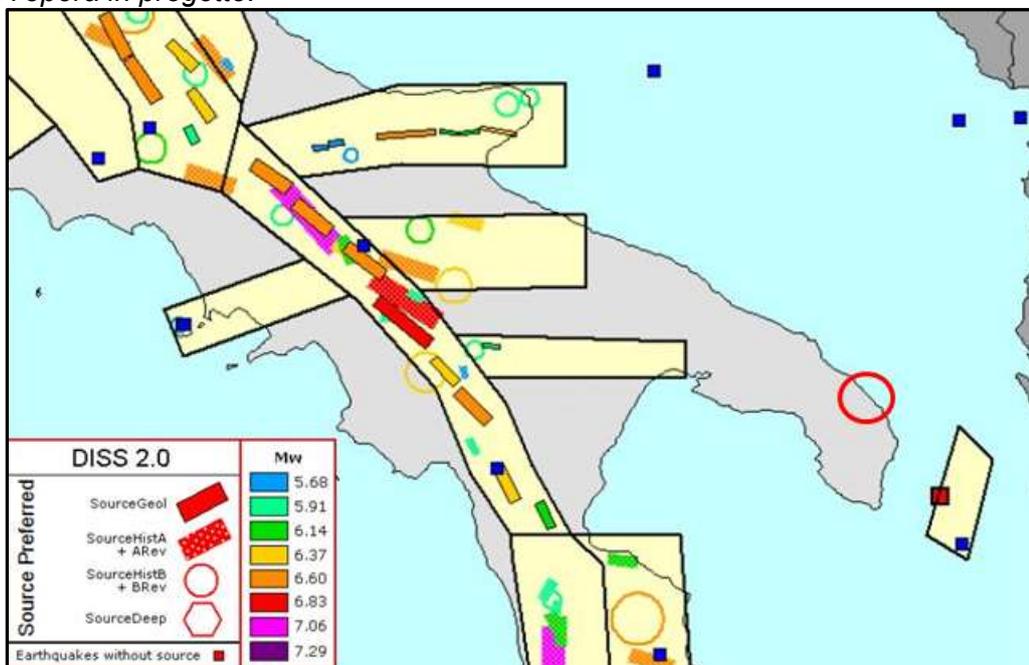


Figura 7-8: Zonazione sismogenetica ZS9 (in campo giallo) a confronto con la distribuzione delle sorgenti sismogenetiche contenute nel DISS 2.0. (da Meletti C. e Valensise G., 2004 mod.) (Fonte: INGV). Nel circolo l'area interessata dall'opera in progetto.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	25 of 98

DISS “Database of Individual Seismogenic Sources”

A partire da luglio 2010, l'INGV ha messo a disposizione la banca dati DISS, (“Database of Individual Seismogenic Sources versione 3.2), un database georiferito che racchiude la tettonica, le faglie e le informazioni paleo-sismiche al fine di caratterizzare al meglio le sorgenti sismogenetiche localizzate sul territorio nazionale e nelle aree limitrofe come la fascia costiera greco-albanese.

Al fine di approfondire ed integrare l'analisi sismogenetica e neotettonica del territorio esaminato si è proceduto alla consultazione di questo database.

Il DISS include le seguenti categorie di sorgenti sismogenetiche:

- Sorgenti sismogenetiche individuali, ovvero una rappresentazione semplificata e tridimensionale del piano di faglia (vedi *Figura 7-9*). Si assume che le sorgenti individuali esibiscano comportamenti caratteristici rispetto alla lunghezza/larghezza di rottura ed alla magnitudo attesa. Le sorgenti sismogenetiche individuali sono definite da dati geologici e geofisici e sono caratterizzate da un set completo di parametri geometrici (strike, dip, lunghezza, larghezza e profondità), cinematici (velocità) e sismologici (spostamento per evento singolare, magnitudo, slip rate, intervallo di ricorrenza). Si assume che le sorgenti sismogenetiche individuali abbiano ricorrenze strettamente periodiche rispetto alla rottura. Le sorgenti sismogenetiche individuali vengono comparate a database a livello mondiale, per valutarne la consistenza in termini di lunghezza, larghezza, spostamento da singolo evento e magnitudine. Questa categoria fornisce le più accurate informazioni disponibili per le sorgenti meglio identificate.

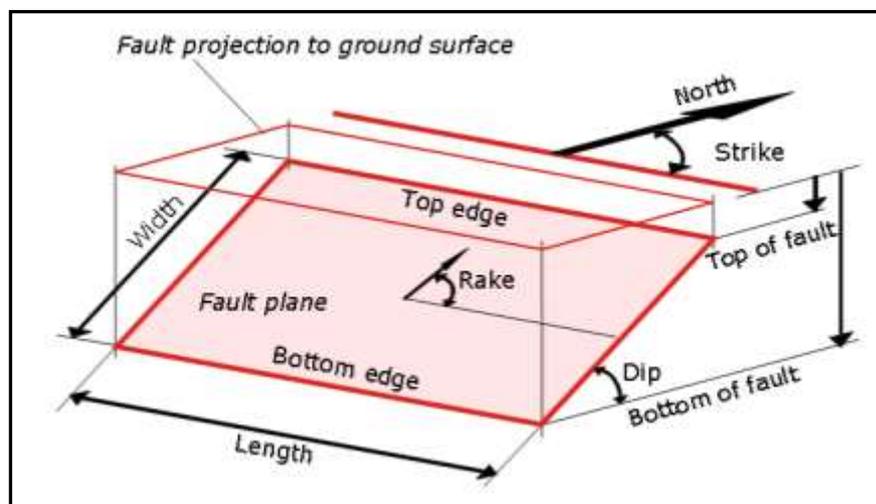


Figura 7-9: Schematizzazione di sorgente sismogenetica individuale

- Sorgenti sismogenetiche composte (precedentemente definite zone sismogenetiche); si tratta di regioni estese contenenti un numero non specificato di sorgenti sismogenetiche (vedi *Figura 7-10*). Le sorgenti sismogenetiche composte non sono associate ad uno specifico set di terremoti o a distribuzioni di terremoti; sono basate su dati geologici e geofisici e sono caratterizzate da parametri geometrici e cinematici. Una sorgente sismogenetica composta è sostanzialmente una struttura dedotta sulla base dei dati geologici regionali di superficie e profondi. Tipicamente una sorgente sismogenetica composta comprende un numero non specificato di sorgenti individuali, per cui la rottura attesa per terremoti è mal definita o sconosciuta. Il potenziale sismico di questa categoria di sorgenti può essere stimato dai cataloghi sismici esistenti.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	26 of 98

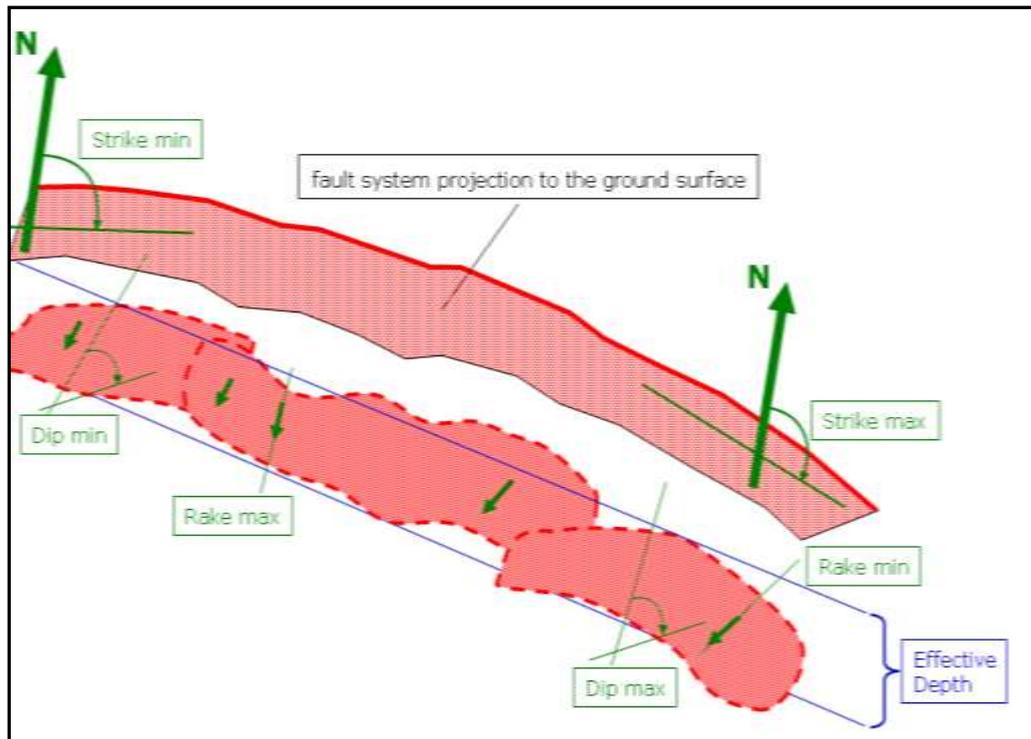


Figura 7-10: Schematizzazione di una sorgente sismogenetica composta

- Sorgenti sismogenetiche “dibattute”, ovvero faglie attive che sono state proposte in letteratura come sorgenti sismogenetiche potenziali ma che non sono state considerate abbastanza affidabili da essere introdotte nel database.

Interazioni con il metanodotto in progetto

Dall’analisi della banca dati DISS 3.2 (<http://diss.rm.ingv.it/dissmap/dissmap.phtml>), è stato possibile verificare le interazioni tra l’area in studio e le sorgenti sismogenetiche.

Come evidenziato dalla Figura 7-11, l’area in studio non interessa sorgenti sismogenetiche.

I parametri che caratterizzano le sorgenti sismogenetiche più prossime all’area investigata, che ricadono nella fascia costiera greco-albanese, sono descritti nelle seguenti tabelle.

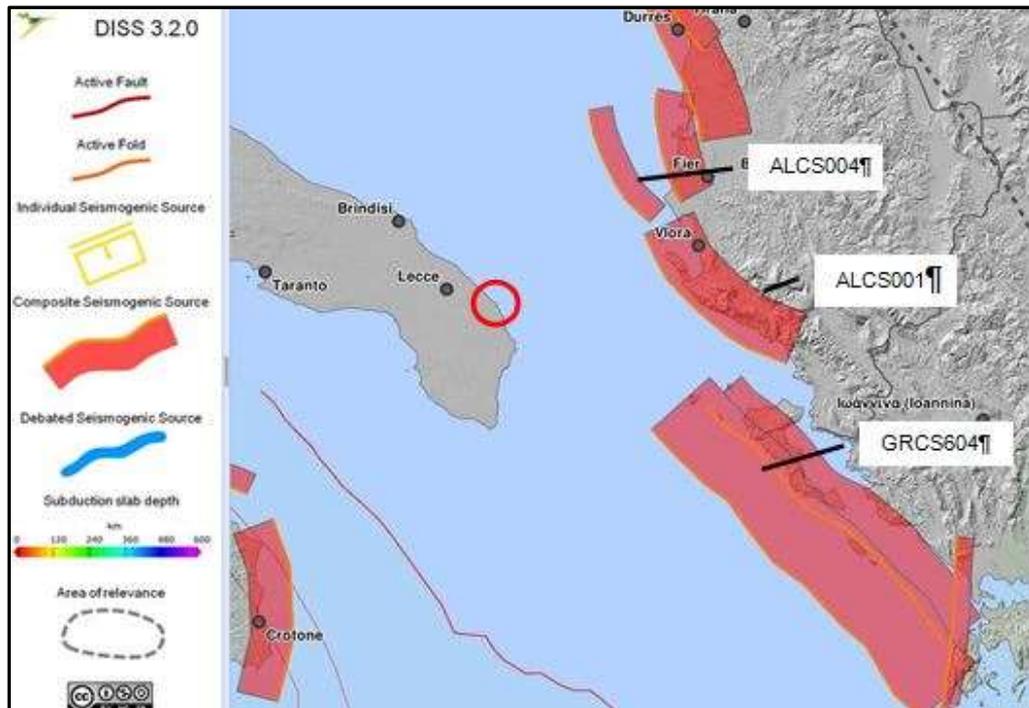


Figura 7-11: Le sorgenti sismogenetiche composte (da DISS 3.2). Nel circolo l'area interessata dall'opera in progetto

I parametri che caratterizzano le sorgenti sismogenetiche più prossime all'area investigata, che ricadono nella fascia costiera greco-albanese, sono descritti nelle seguenti tabelle (Tabella 7-2; Tabella 7-3; Tabella 7-4).

Tabella 7-2: Parametri geometrici e sismici caratterizzanti la sorgente sismogenetica composta ALCS001 "Sazani" (Fonte: DISS 3.2)

CODICE		ALCS001		
Nome		Sazani		
Descrizione	Parametri	Qual	Fonte	
Minima profondità (km)	1	EJ	Desunto da considerazioni sulla tettonica.	
Massima profondità (km)	15.0	EJ	Desunto da dati geologici e sismologici regionali.	
Strike (deg) min...max	290...340	LD	Basato su dati geologici da vari autori.	
Dip (deg) min...max	25...40	EJ	Desunto da dati geologici e di terremoto.	
Rake (deg) min...max	80...100	LD	Basato su dati sismologici da varie fonti.	
Slip Rate (mm/y) min...max	0.5...1.5	EJ	Desunto da dati di profili sismici e considerazioni geodinamiche.	
Massima magnitudo (Mw)	7.2	EJ	Desunto dalle caratteristiche delle faglie e considerazioni geologiche regionali	
Q-keys	LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement			

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	28 of 98

Tabella 7-3: Parametri geometrici e sismici caratterizzanti la sorgente sismogenetica composta ALCS004 "Albania offshore" (Fonte: DISS 3.2)

CODICE	ALCS004		
Nome	Albania offshore		
Descrizione	Parametri	Qual	Fonte
Minima profondità (km)	2.0	EJ	Desunto da dati geologici regionali.
Massima profondità (km)	7.0	EJ	Desunto da dati geologici regionali.
Strike (deg) min...max	300...350	LD	Basato sulla Carta di Fantoni e Francioni (2009).
Dip (deg) min...max	20...40	EJ	Desunto da dati geologici regionali.
Rake (deg) min...max	80...100	EJ	Desunto da dati geologici e sismologici regionali.
Slip Rate (deg) min...max	0.5...1.5	EJ	Desunto da considerazioni geologiche e geodinamiche
Massima magnitudo (Mw)	6.0	EJ	Desunto dalle caratteristiche delle faglie.
Q-keys	LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement		

Tabella 7-4: Parametri geometrici e sismici caratterizzanti la sorgente sismogenetica composta GRCS604 "Kerkyra offshore" (Fonte: DISS 3.2)

CODICE	GRCS604		
Nome	Kerkyra offshore		
Descrizione	Parametri	Qual	Fonte
Minima profondità (km)	3.0	EJ	Desunto da dati geologici da Finetti e Del Ben (2005).
Massima profondità (km)	20.0	EJ	Desunto da dati geologici da Finetti e Del Ben (2005).
Strike (deg) min...max	280...350	EJ	Desunto da dati geologici da Polonia (2010).
Dip (deg) min...max	20...40	EJ	Desunto da considerazioni geologiche.
Rake (deg) min...max	80...100	LD	Basato su dati sismologici da vari autori.
Slip Rate (deg) min...max	1.0...2.0	EJ	Desunto da considerazioni geodinamiche
Massima magnitudo (Mw)	7.1	EJ	Desunto dal più grande terremoto dell'area.
Q-keys	LD = Literature Data; OD = Original Data; ER = Empirical Relationship; AR = Analytical Relationship; EJ = Expert Judgement		

7.4 Caratterizzazione della sismicità

In considerazione di quanto sopra descritto, l'opera in progetto si colloca in aree con sismicità molto bassa. L'intero settore esaminato è esterno a zone e sorgenti sismogenetiche. Tuttavia l'area risente, seppure in maniera molto modesta, dei terremoti i cui epicentri si collocano nelle zone sismogenetiche più prossime ed in particolare quelle dell'alto Ionio e della fascia costiera greco-albanese.

In base alla consultazione del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (vedi *Tabella 7-1*), dai dati ricavati dalla ZS9 (vedi Figura 7-8) e dal DISS 3.2 (per quanto riguarda le aree sismogenetiche più prossime all'area studiata (vedi *Tabella 7-2*, *Tabella 7-3*, *Tabella 7-4*), risulta che tali zone sono caratterizzate da magnitudo Mw=6.9-7.3.

Si evidenzia che i valori Mw sono derivati da dati non strumentali ma son stati stimati da fonti storiche e considerazioni di ordine geologico-geodinamico e tettonico; inoltre le aree sismogenetiche esaminate sono ubicate a distanze dell'ordine dei 50-100 km dall'area di studio.

In termini di pericolosità, facendo riferimento alla O.P.C.M. n° 3519 del 28 aprile 2006 "Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone" dove ciascuna zona è individuata mediante valori di accelerazione massima del suolo ag con probabilità di superamento del 10% in 50 anni, riferiti a suoli rigidi caratterizzati da Vs30 > 800 m/s (Mappa di pericolosità sismica su scala nazionale), l'area in esame è caratterizzata da valori di PGA compresi tra 0.050 g e 0.075 g per un tempo di ritorno di 475 anni.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	29 of 98

Tale valore di pericolosità di base non ha però influenza sulla progettazione. Le attuali Norme Tecniche per le Costruzioni (Rif. /2/), infatti, hanno modificato il ruolo che la classificazione sismica aveva ai fini progettuali.

Con l'entrata in vigore delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2008, per ogni opera ci si deve riferire ad una accelerazione di riferimento "propria" individuata sulla base delle coordinate geografiche dell'area di progetto e in funzione della vita nominale dell'opera. Un valore di pericolosità di base, dunque, definito per ogni punto del territorio nazionale, su una maglia quadrata di 5 km di lato, indipendentemente dai confini amministrativi comunali.

Per quanto riguarda l'area studiata, secondo le mappe interattive di pericolosità sismica di riferimento per la progettazione (cfr siti web <http://zonesismiche.mi.ingv.it>), l'accelerazione massima attesa, con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, su suolo di riferimento, cioè rigido e pianeggiante (categoria sottosuolo A, NTC 2008; Rif. /2/), per un tempo di ritorno di 475 anni, varia da 0,050 g a 0,075 g (vedi Figura 7-12).

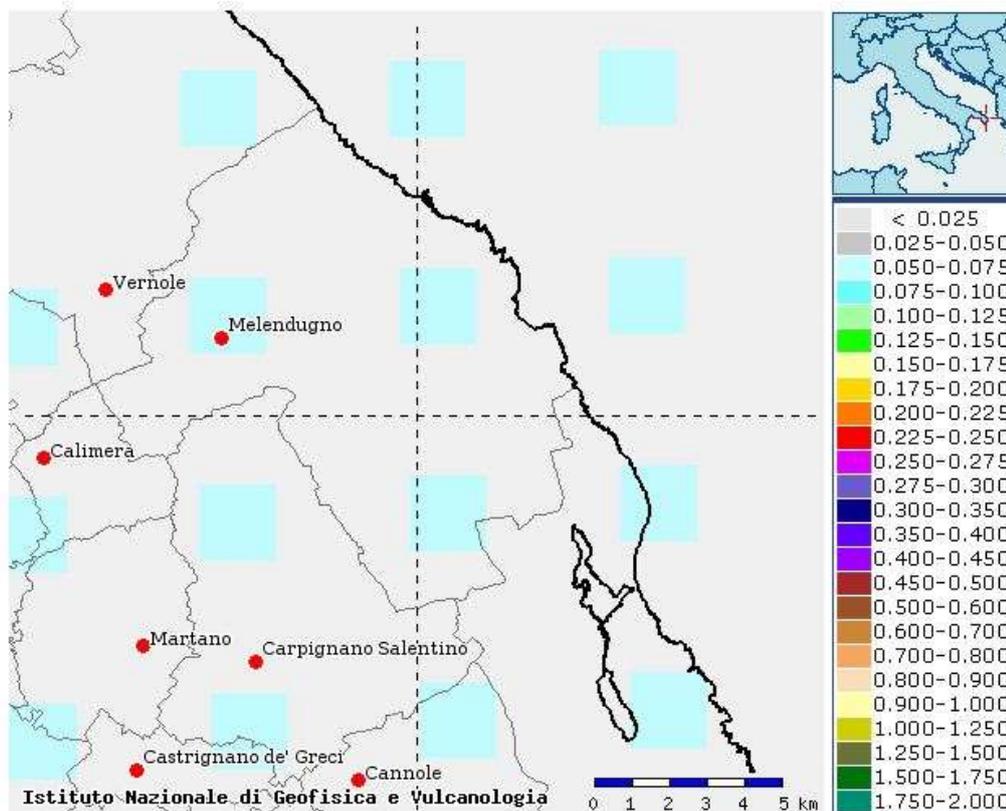


Figura 7-12: Stralcio della Mappa di pericolosità sismica dell'area in studio espressa in termini di accelerazione orizzontale massima del terreno (a_g) per un tempo di ritorno di 475 anni

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	30 of 98

8 PERICOLOSITÀ SISMICA DI BASE

Il Comune di Melendugno (LE) è classificato come “Categoria 4” nella Deliberazione della Giunta Regionale n. 153 del 2 marzo 2004 (Rif. /4/). Il microtunnel costituisce un’opera infrastrutturale strategica che, in accordo con il DGR, è soggetta a progettazione antisismica, da effettuarsi in accordo con la normativa vigente.

La “pericolosità sismica di base”, nel seguito chiamata semplicemente pericolosità sismica, costituisce l’elemento di conoscenza primario per la determinazione delle azioni sismiche da applicare alle costruzioni e alle strutture connesse con il funzionamento di opere come i metanodotti.

In accordo con le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008 DM 14/01/2008; Rif. /2/), la pericolosità sismica è definita considerando condizioni ideali di sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale.

All’interno del territorio nazionale italiano, i valori di pericolosità sismica sono fissati, per diversi intervalli di riferimento (periodo di ritorno, T_R), su un reticolo costituito da maglie elementari di 0,05 gradi, per un totale di 10751 nodi (Tabella A1 delle NTC 2008; <http://esse1.mi.ingv.it/>),

Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno (T_R) considerati sono forniti tre parametri per la definizione dell’azione sismica di progetto:

- a_g accelerazione orizzontale massima attesa al bedrock con superficie topografica orizzontale (espressa in $g/10$);
- 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 di accelerazione orizzontale.

Da un punto di vista normativo, pertanto, i parametri sismici di un sito variano in funzione della posizione geografica dell’opera rispetto ai nodi del reticolo di riferimento, indipendentemente dal comune di appartenenza. Per ciascuno dei periodi di ritorno (T_R) considerati dalla pericolosità sismica si ricavano, riferendosi ai valori corrispondenti al 50-esimo percentile, i parametri sismici di progetto.

Per un qualunque punto del territorio, non ricadente nei nodi del reticolo di riferimento i valori dei parametri d’interesse per la definizione dell’azione sismica di progetto (a_g , F_o , T_c^*) possono essere calcolati come media pesata dei valori assunti da tali parametri nei quattro vertici del reticolo di riferimento contenente il punto in esame, utilizzando come pesi gli inversi delle distanze tra il punto in questione ed i quattro vertici.

Le NTC 2008 definiscono l’azione sismica considerando anche un periodo di ritorno (T_R) che è funzione della probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (PV_R) nel periodo di riferimento dell’opera (V_R).

Il periodo di riferimento dell’opera (V_R) si ottiene dal prodotto tra la vita nominale (V_N), che è funzione del tipo di opera, e il coefficiente d’uso (C_u), funzione della classe d’uso della costruzione (cfr. paragrafo 2.4.3 delle NTC 2008). Cautelativamente, in questo studio, è stato assunto un periodo di vita nominale (V_N) di 100 anni e un coefficiente d’uso 2 (opera strategica), da cui si ottiene un periodo V_R pari a 200 anni.

Le probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale (PV_R) nel periodo di riferimento dell’opera (V_R) sono funzione dell’importanza dell’opera e, di conseguenza, dello stato limite considerato (cfr. paragrafo 7.1 delle NTC 2008).

Data l'importanza dell'opera, ed in accordo al paragrafo 7.1 delle NTC 2008, sono stati considerati due stati limite:

- Stato Limite di Danno, SLD (in esercizio);
- Stato Limite di salvaguardia della Vita, SLV (a rottura).

I rispettivi valori di probabilità di superamento (P_{VR}) sono forniti dalla Tabella 3.2.I delle NTC 2008 (Figura 8-1).

Tabella 3.2.I – Probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato

Stati Limite		P_{VR} : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R
Stati limite di esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati limite ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

Figura 8-1: Probabilità di superamento di un valore di accelerazione orizzontale al bedrock in funzione dello stato limite considerato (Tabella 3.2.I delle NTC 2008); in rosso sono evidenziati gli stati limite considerati.

Da tali assunzioni sono stati calcolati i valori dei periodi di ritorno (T_R) per i due stati limite considerati mediante la formula:

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

da cui si ottengono i seguenti corrispettivi periodi di ritorno T_R (Figura 8-2):

T_R pari a 201 anni per uno Stato Limite di Danno (SLD);
 T_R pari a 1898 anni per uno Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV).

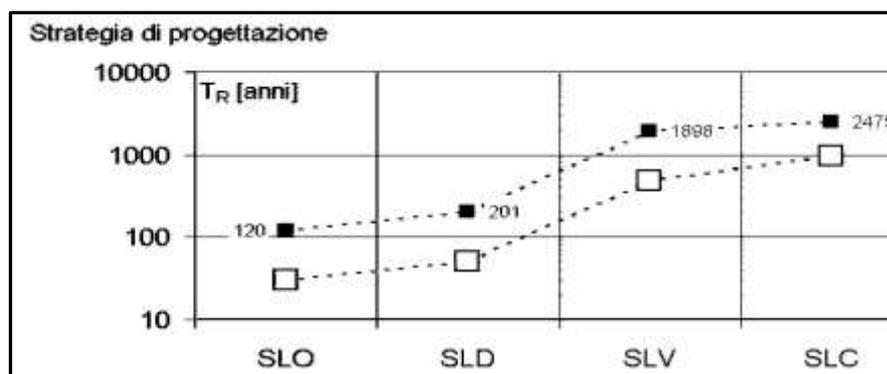


Figura 8-2: Tempi di ritorno al variare dello stato limite considerato per una vita di riferimento $V_R = 200$ anni

Calcolati i periodi di ritorno per i due stati limite SLD ed SLV sono stati calcolati i valori di accelerazione orizzontale massima (a_g), attesi al bedrock con superficie topografica orizzontale, lungo la fascia di territorio interessata dal progetto (Tabella 8-1):

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	32 of 98

Tabella 8-1: Valori di accelerazione orizzontale al bedrock

STATO LIMITE	T_R (ANNI)	A_G (G)
SLD	201	0,035
SLV	1898	0,093

8.1 Risposta sismica locale

Le azioni sismiche sono definite attraverso uno spettro di risposta elastico di progetto, eventualmente ridotto per tenere in conto gli effetti della duttilità strutturale agli stati limite ultimi. Tale spettro ha il significato di luogo dei valori di accelerazione massima subita da un oscillatore armonico di dato periodo fondamentale di vibrazione e smorzamento pari al 5% del valore critico. L'ordinata spettrale a periodo di vibrazione nulla corrisponde all'accelerazione di picco del suolo (Peak Ground Acceleration, PGA).

Risulta pertanto implicito, in questa definizione dell'azione sismica, che il suo oggetto principale è una struttura fuori terra che risponde al terremoto secondo le sue caratteristiche inerziali e di rigidità.

Una struttura interrata, invece, tende a muoversi solidalmente con il terreno circostante, trascurando in prima approssimazione le differenze legate alla rigidità relativa tra struttura e terreno circostante. Le sollecitazioni massime sul Microtunnel, pertanto, sono riconducibili non soltanto ai valori massimi di spostamento, velocità e accelerazione del suolo, per effetto della sollecitazione dinamica, ma anche ai valori di spostamento massimo che il Microtunnel può subire per effetto di risposta fortemente non-lineare del suolo, con deformazioni permanenti potenzialmente legate a fenomeni di rottura di faglia, frane, liquefazione o compattazione del terreno.

L'approccio alla valutazione della sismicità di un'area previsto dalla normativa italiana ed internazionale consiste nell'analisi del moto sismico nel suo propagarsi dal sottosuolo (bedrock) verso la superficie libera, a prescindere dai potenziali effetti sull'ambiente fisico e sulle strutture presenti.

In definitiva, quindi, una volta identificati i valori delle accelerazioni massime attese al suolo rigido (vedi Paragrafo 8), è necessario valutare la loro variazione (in generale amplificazione) negli strati più superficiali attraverso la stima di due parametri:

- categoria di sottosuolo;
- condizione topografica.

8.1.1 Caratterizzazione del sottosuolo

Le NTC 2008 suddividono il sottosuolo considerando cinque classi di riferimento, in funzione della natura e di specifici parametri di comportamento meccanico dei terreni. I diversi tipi di sottosuolo inducono modifiche sul segnale sismico con variazioni dell'accelerazione di picco e del contenuto in frequenza, secondo la rappresentazione schematica mostrata nella seguente Figura 8-3.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	33 of 98

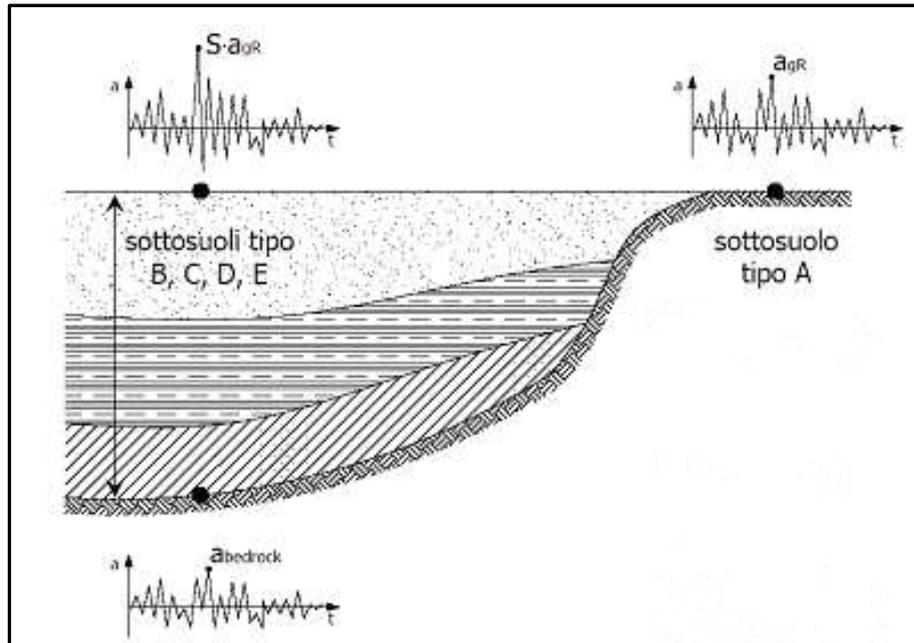


Figura 8-3: Rappresentazione schematica del significato delle accelerazioni (al bedrock ed in superficie) e delle classi di sottosuolo secondo le NTC 2008.

La classificazione individua sottosuoli a rigidezza decrescente, partendo dal sottosuolo tipo A, costituito sostanzialmente da roccia affiorante o ricoperta da uno strato meno rigido, con spessore massimo di 3 m, fino a sottosuoli molto deformabili e suscettibili di fenomeni di rottura per la sola azione sismica.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	34 of 98

Per maggior chiarezza si riportano di seguito le categorie di sottosuolo secondo le NTC 2008:

- A** - *Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di V_{S30} superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m;*
- B** - *Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT\ 30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $cu_{30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina);*
- C** - *Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT\ 30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < cu_{30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina);*
- D** - *Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di V_{S30} inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT\ 30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $cu_{30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina);*
- E** - *Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m, posti sul substrato di riferimento (con $V_{S30} > 800$ m/s);*

In aggiunta a queste categorie se ne definiscono altre due, per le quali sono richiesti studi speciali per la definizione dell'azione sismica da considerare:

- S1** - *Depositi di terreni caratterizzati da valori di V_{S30} inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < cu_{30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche;*
- S2** - *Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.*

Nelle definizioni precedenti V_{S30} rappresenta la velocità media di propagazione entro i primi 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}}$$

in cui h_i e V_i indicano, rispettivamente, lo spessore (in metri) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$ m) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

La classificazione della categoria di suolo è stata eseguita considerando le indagini geognostiche eseguite (dirette ed indirette; Rif. /26/). In particolare, le indagini geofisiche hanno permesso di verificare valori di V_{S30} compresi tra 425 e 550 m/s, individuando di conseguenza terreni appartenenti alla categoria "B".

La definizione della categoria di sottosuolo permette il calcolo dei seguenti coefficienti (vedi Tabella 8-2 e Tabella 3.2.V delle NTC 2008):

- coefficiente di amplificazione stratigrafica (S_s), necessario per calcolare l'accelerazione di picco al suolo (a_{gS} o PGA);

- coefficiente funzione della categoria di sottosuolo (C_C), necessario per il calcolo del periodo T_C e quindi della velocità orizzontale massima attesa al suolo (V_g o PGV).

Tabella 8-2: Espressioni di S_S e C_C (DM 14/01/2008)

CATEGORIA SOTTOSUOLO	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 F_0 a_g/g \leq 1,20$	$1,10 (T^*_C)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 F_0 a_g/g \leq 1,50$	$1,05 (T^*_C)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 F_0 a_g/g \leq 1,80$	$1,25 (T^*_C)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 F_0 a_g/g \leq 1,60$	$1,15 (T^*_C)^{-0,40}$

Per il sito in esame i valori calcolati di S_S e C_C sono rispettivamente pari a 1,20 e 1,255

8.1.2 Condizioni topografiche

Le categorie topografiche sono definite sulla base di alcune caratteristiche morfologiche semplificate (pendenza media e dimensioni delle creste) e dell'ubicazione relativa del punto di interesse (base, sommità, ecc.) rispetto a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali (creste o dorsali allungate), con altezze maggiori di 30 metri.

Le NTC 2008 assegnano a ciascuna categoria un coefficiente di amplificazione topografica (S_T) (cfr. Tab. 3.2.VI delle NTC 2008), riportato in Tabella 8-3:

Tabella 8-3: Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T (DM 14/01/2008)

CATEGORIA TOPOGRAFICA	UBICAZIONE DELL'OPERA O DELL'INTERVENTO	S_T
T1	-	1.0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1.2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1.4

Questo coefficiente, insieme al coefficiente di amplificazione stratigrafica (S_S) precedentemente determinato, è necessario per il calcolo del valore di accelerazione orizzontale massima attesa al suolo (PGA).

Il tratto di condotta oggetto del presente studio si sviluppa su un territorio completamente pianeggiante classificabile all'interno della categoria topografica "T1".

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	36 of 98

8.2 Accelerazione orizzontale in superficie

La stima dell'accelerazione orizzontale di picco in superficie (a_{gs} o PGA) lungo il territorio di interesse si ottiene dal prodotto tra il fattore di risposta sismica locale (S) e l'accelerazione massima orizzontale attesa al suolo rigido (a_g). Il coefficiente S, che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche, può essere calcolato mediante la relazione:

$$S = S_s * S_T$$

in cui S_s è il coefficiente di amplificazione stratigrafica (cfr. Tabella 3.2.V delle NTC 2008) ed S_T è il coefficiente di amplificazione topografica (cfr. Tab. 3.2.VI delle NTC 2008).

La tabella sottostante (Tabella 8-4) riporta i valori di accelerazione orizzontale in superficie, calcolati applicando la formula appena descritta:

Tabella 8-4: Valori di accelerazione orizzontale in superficie

STATO LIMITE	T_R (ANNI)	A_G (G)
SLD	201	0,042
SLV	1898	0,112

8.3 Velocità orizzontale delle onde sismiche in superficie

Una completa analisi dell'azione sismica attesa in un sito (o lungo un tracciato) prevede anche la stima della massima velocità orizzontale al suolo (V_g o PGV) per gli stati limite considerati. Le norme tecniche per le costruzioni NTC 2008 riportano, nel paragrafo 3.2.3.3, la relazione per il calcolo di tale velocità:

$$V_g = PGV = 0.16 * a_g * S * T_c$$

in cui:

- a_g : accelerazione di picco attesa al bedrock (espressa in g);
- S: fattore di risposta sismica locale;
- T_c : periodo del tratto iniziale a velocità costante dello spettro.

Quest'ultimo parametro si ottiene dalla formula:

$$T_c = C_c * T_c^*$$

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	37 of 98

Essendo

- T_c^* : definito, insieme al valore di a_g , per ciascun nodo della discretizzazione (Tabella A1 delle NTC 2008);
- C_c un coefficiente funzione della categoria di sottosuolo (Tab. 3.2.V delle NTC 2008).

La formula per la PGV, proposta circa 20 anni fa sulla base di una disponibilità di dati accelerometrici a quel tempo molto limitata, trova la sua giustificazione in un legame empirico tra accelerazione massima e velocità massima in corrispondenza del periodo d'angolo T_c (si ricorda che $0.16 \approx 1/2\pi$).

Mediante tale relazione sono stati calcolati i valori di velocità orizzontale massimi attesi al suolo nell'area in esame (Tabella 8-5).

Tabella 8-5: Valori di velocità orizzontale in superficie

STATO LIMITE	T_R (ANNI)	PGV (M/S)
SLD	201	0,028
SLV	1898	0,114

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	38 of 98

9 VERIFICA DEL POTENZIALE DI LIQUEFAZIONE

Il fenomeno della liquefazione avviene quando si verifica un aumento repentino delle sovrappressioni interstiziali all'interno di un volume di terreno sciolto saturo.

Questo aumento di pressione, generato dall'acqua circolante nei pori, ha come conseguenza una riduzione della resistenza al taglio del deposito.

L'area costiera oggetto del presente studio non presenta terreni costituiti da depositi sciolti, ma è caratterizzata dalla presenza delle Calcareniti del Salento, costituite da calcareniti marnose poco coerenti a grana medio fine di colore in genere giallo o grigio passanti a calcareniti grossolane fossilifere e sabbioni calcarei più o meno cementati ed argillosi ricoperti da crostoni molto duri di colore giallo o rossastro.

Tuttavia, nonostante la presenza dei terreni formazionali, si è eseguita la verifica di suscettibilità alla liquefazione al fine di valutare il comportamento dei livelli a prevalenza sabbiosa.

L'attività è stata articolata nei seguenti passi.

1. Analisi della pericolosità sismica dell'area di studio al fine di verificare l'accelerazione sismica massima attesa in superficie;
2. Analisi delle indagini geognostiche eseguite, al fine di individuare le caratteristiche del suolo e la profondità della falda acquifera;
3. Verifica preliminare di suscettibilità alla liquefazione; infatti, secondo quanto previsto nelle NTC2008 la verifica alla liquefazione può essere evitata solo qualora si manifesti almeno una delle seguenti condizioni (par. 7.11.3.4.2):
 - a. eventi sismici con magnitudo attesa M_w inferiore a 5;
 - b. accelerazione orizzontale massima attesa in superficie in condizioni di campo libero (in assenza di manufatti) minori di 0.1 g;
 - c. profondità media stagionale della falda freatica superiore ai 15 m;
 - d. distribuzione granulometrica esterna ai fusi granulometrici liquefacibili riportati nelle norme stesse;
 - e. depositi costituiti da sabbie pulite con elevata resistenza penetrometrica normalizzata;
4. Verifica alla liquefazione secondo il seguente schema di flusso;
 - a. Valutazione del rapporto di sforzo ciclico (CSR) secondo la formula (NCEER; Rif. /12/):

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

essendo

a_{max} l'accelerazione massima attesa in superficie
 σ_{v0} la pressione geostatica verticale totale,
 σ'_{v0} la pressione geostatica verticale efficace,
 r_d coefficiente di riduzione dello sforzo con la profondità.

- b. Valutazione del rapporto di resistenza ciclica per una magnitudo attesa di 7.5 ($CRR_{7.5}$). In funzione delle indagini eseguite e dei dati disponibili, saranno utilizzate idonee metodologie di calcolo;
- c. Correzione di $CRR_{7.5}$ attraverso un fattore di scala (MSF) per tener conto della magnitudo del terremoto attesa in sito:

$$CRR = CRR_{7.5} \times MSF$$

- d. Calcolo del coefficiente di sicurezza alla liquefazione (FS) relativo allo strato di terreno considerato:

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

5. Eventuale calcolo dei cedimenti verticali post-sismici.

La magnitudo M_w utilizzata per le verifiche è stata derivata dallo studio di disaggregazione disponibile sul sito web dell'INGV (Figura 9-1).

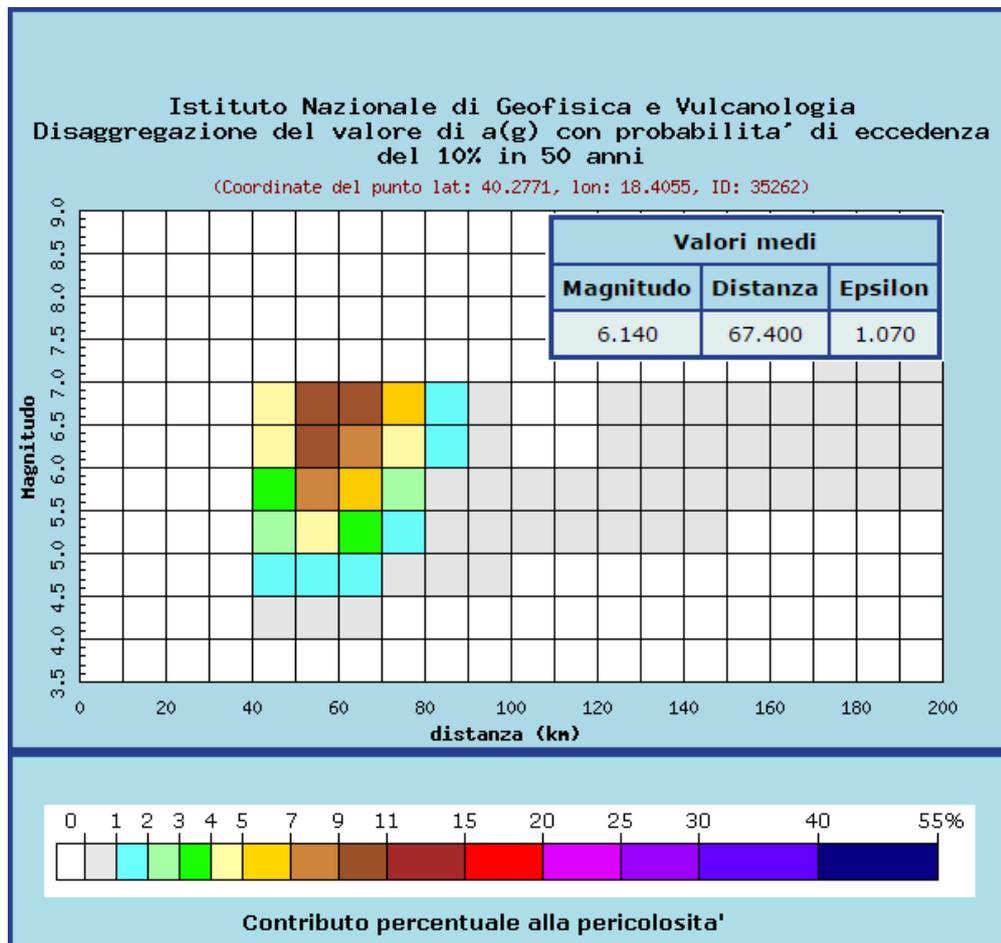


Figura 9-1: Disaggregazione del valore a (g) con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni (INGV)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	40 of 98

Tale studio permette di evidenziare i valori di magnitudo M e distanza R che maggiormente contribuiscono alla pericolosità sismica calcolata in un certo sito. I risultati ottenuti indicano un valore di magnitudo pari a 6,14, che sarà utilizzato per la verifica della suscettibilità alla liquefazione.

9.1 Analisi delle prove sismiche in foro (Downhole)

Nell'area interessata dal presente studio, sono state eseguite due prove sismiche in foro (DH1 e DH2), dalla profondità di 30 metri fino al piano campagna, all'interno dei fori realizzati per i sondaggi ST-BH4 e ST-BH5 (vedi Rif. /26/ e Figura 9-2).

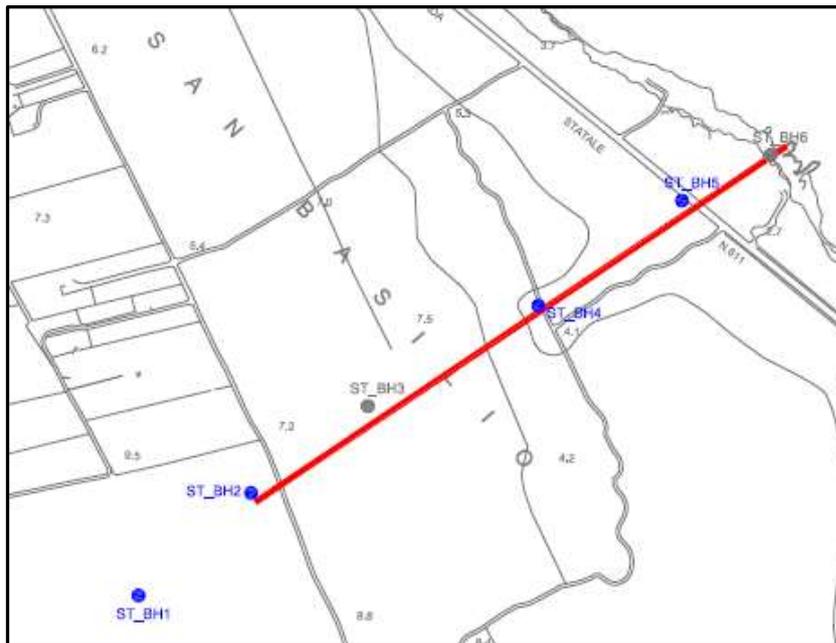


Figura 9-2: Ubicazione delle indagini geotecniche

Le prove downhole permettono di verificare l'andamento delle onde sismiche V_p e V_s ad intervalli di profondità predefiniti (2 m) e di derivare le caratteristiche del terreno. La profondità della falda acquifera è stata rilevata nel corso delle indagini geognostiche.

Per la valutazione della suscettibilità dei terreni alla liquefazione, il calcolo del relativo CRR è stato eseguito in accordo con le indicazioni fornite dal National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER; Rif. /12/):

$$CRR = \tau_f / \sigma'_v = a (V_{S1} / 100)^2 + b [1 / (V_{S1c} - V_{S1}) - 1 / V_{S1c}]$$

Essendo:

a	0,022
b	2.8
V_{S1}	velocità delle V_s corretta per le sovrappressioni
V_{S1c}	limite superiore delle velocità V_{S1} ,

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	41 of 98

I risultati delle verifiche eseguite (Figura 9-3 e Figura 9-4) mostrano che i terreni attraversati, sottoposti alle azioni sismiche di progetto, non sono suscettibili a liquefazione.

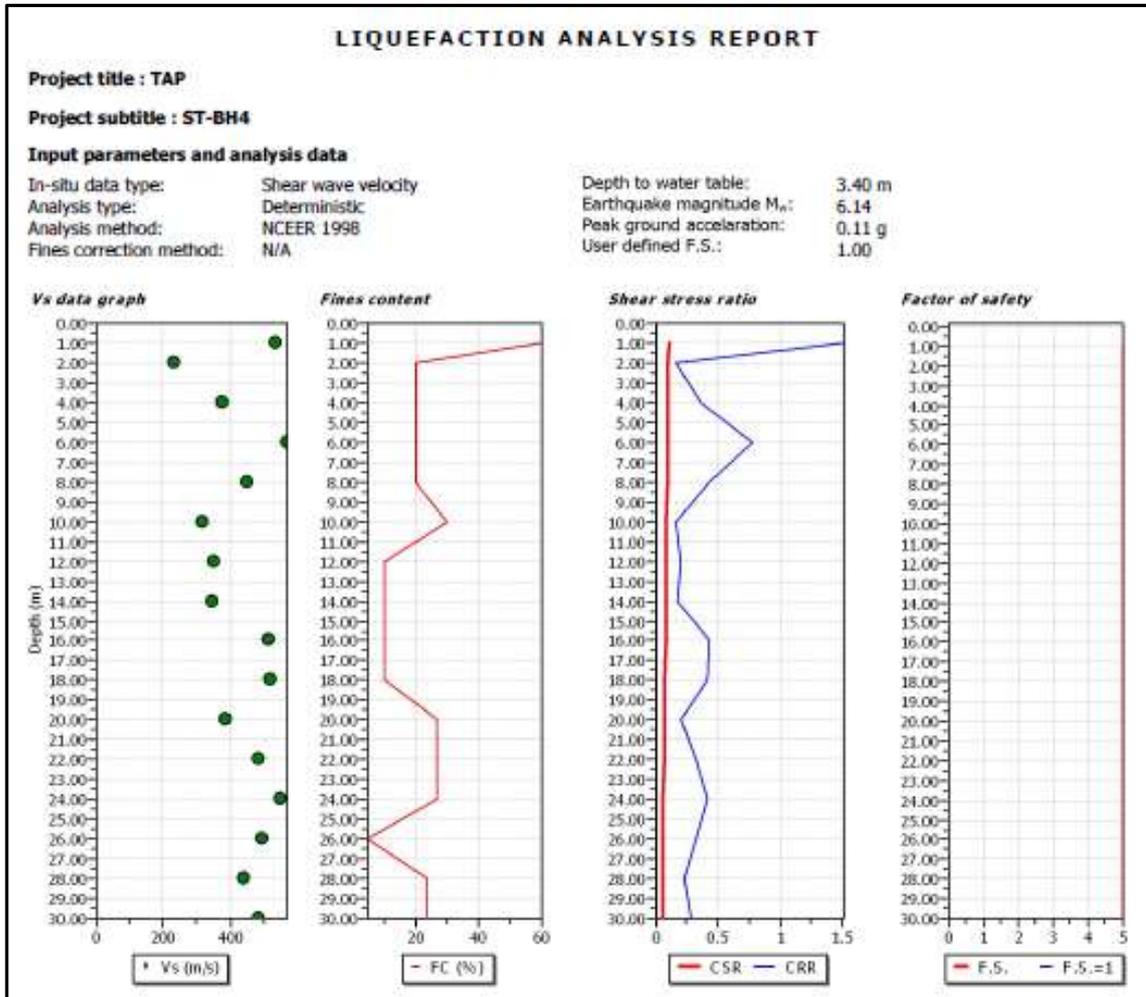


Figura 9-3: Rappresentazione sintetica della verifica alla suscettibilità alla liquefazione eseguita per il DH1, lungo il sondaggio ST-BH4

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	42 of 98

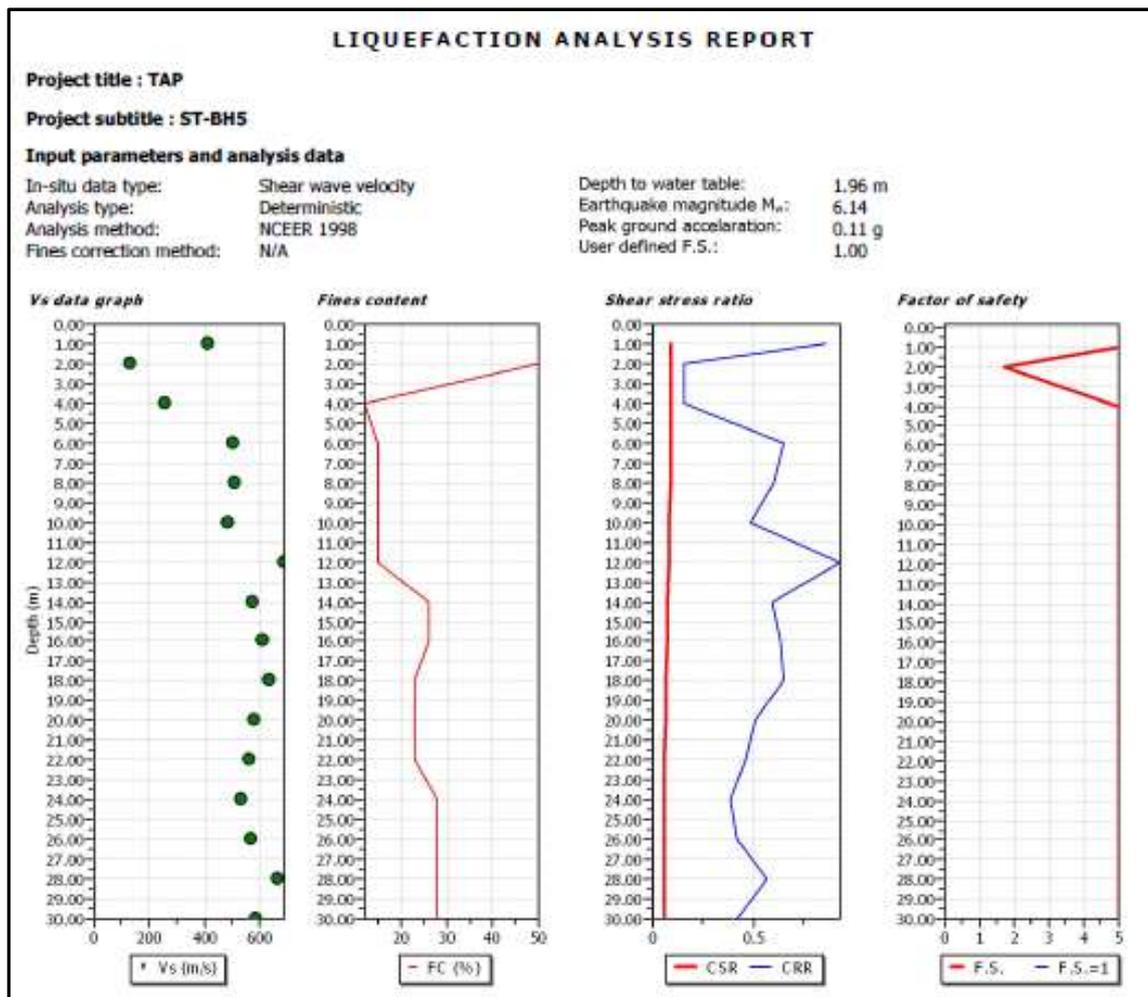


Figura 9-4: Rappresentazione sintetica della verifica alla suscettibilità alla liquefazione eseguita per il DH2, lungo il sondaggio ST-BH5

9.2 Analisi dei sondaggi a carotaggio continuo (Borehole)

Nell'area di studio si sono realizzati quattro sondaggi a carotaggio continuo: ST-BH1; ST-BH2; ST-BH3; ST-BH4 (Figura 9-2).

Il sondaggio ST-BH1 ha una profondità di 10 metri dal piano campagna, ST-BH2 è stato spinto fino a 20 metri mentre ST-BH3 e ST-BH4 raggiungono i 30 metri dal p.c. (vedi Rif. /26/).

Per ognuno dei sondaggi, al fine di caratterizzare i terreni del sottosuolo, si sono eseguite prove SPT in foro e si sono raccolti campioni indisturbati per le prove di laboratorio.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	43 of 98

Per la valutazione della suscettibilità dei terreni alla liquefazione, il calcolo del relativo CRR è stato eseguito in accordo con la metodologia proposta da Boulanger e Idriss nel 2004 (Rif. /13/) utilizzando la seguente formula:

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

che esprime una correlazione diretta tra il rapporto di resistenza ciclica (CRR), normalizzato per un terremoto di magnitudo 7,5 e per una tensione efficace pari ad una atmosfera, e il numero di SPT equivalente riferito a sabbia pulita.

I risultati delle verifiche eseguite (Figura 9-5, Figura 9-6, Figura 9-7 e Figura 9-8) mostrano che i terreni attraversati, sottoposti alle azioni sismiche di progetto, non sono suscettibili a liquefazione.

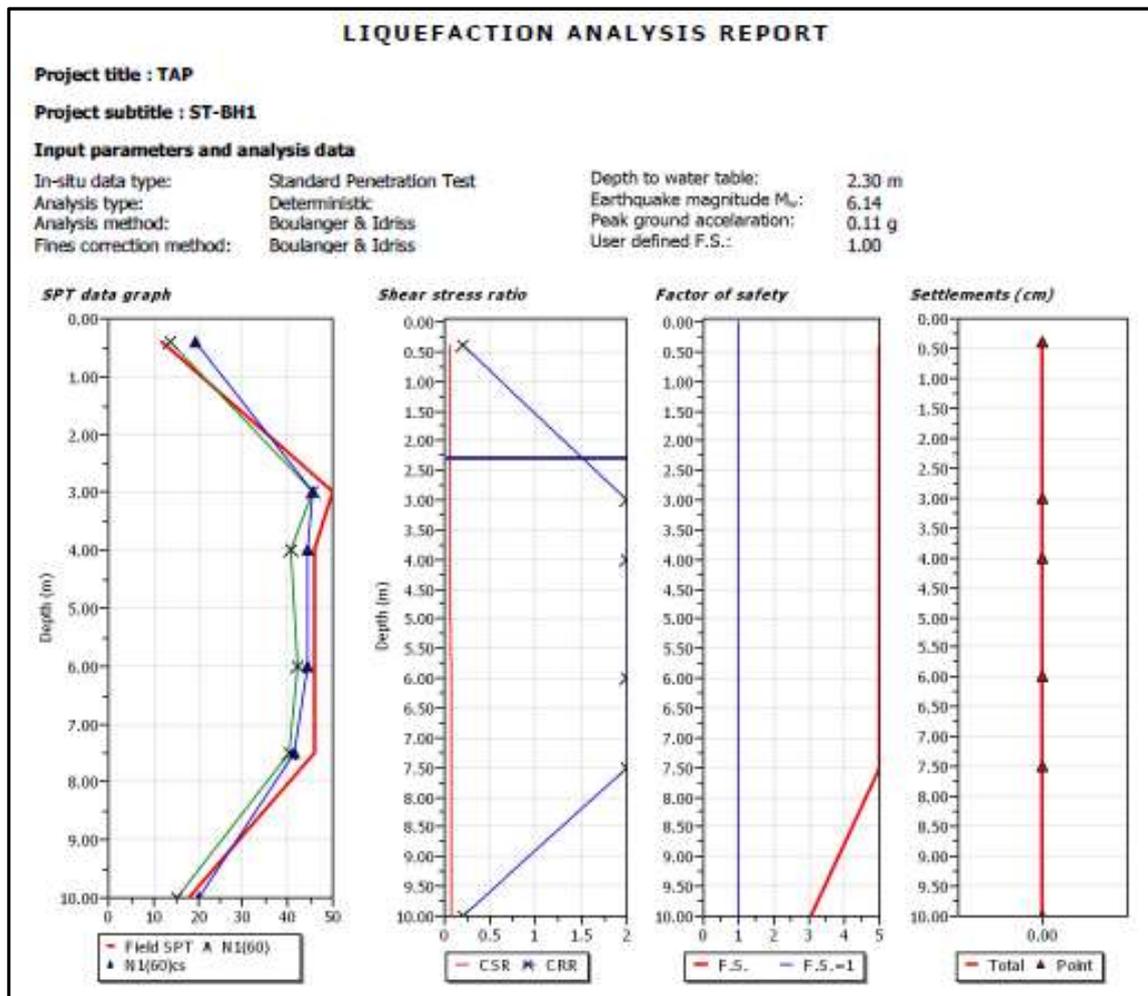


Figura 9-5: Rappresentazione sintetica della verifica alla suscettibilità alla liquefazione eseguita per il sondaggio ST-BH1

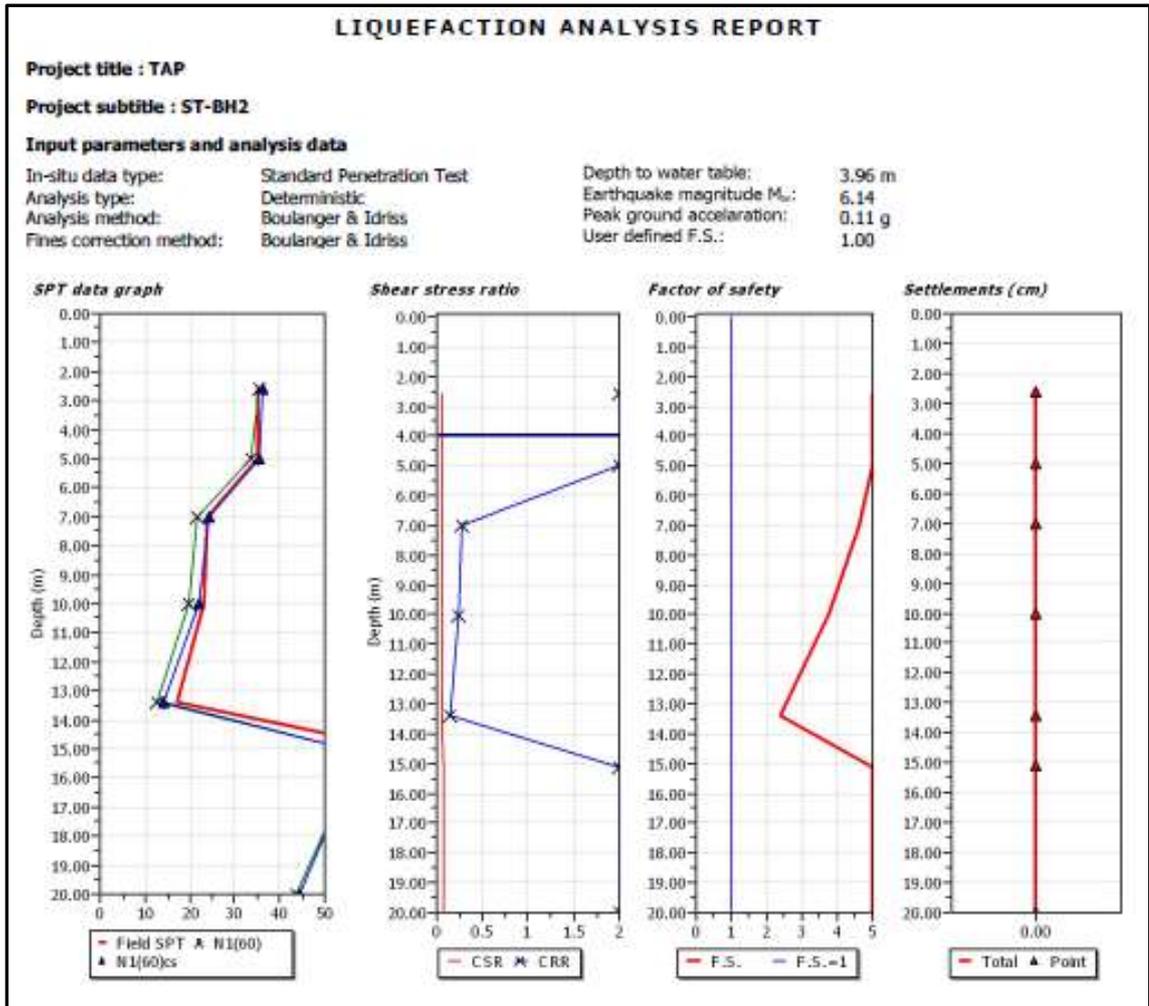


Figura 9-6: Rappresentazione sintetica della verifica alla suscettibilità alla liquefazione eseguita per il sondaggio ST-BH2

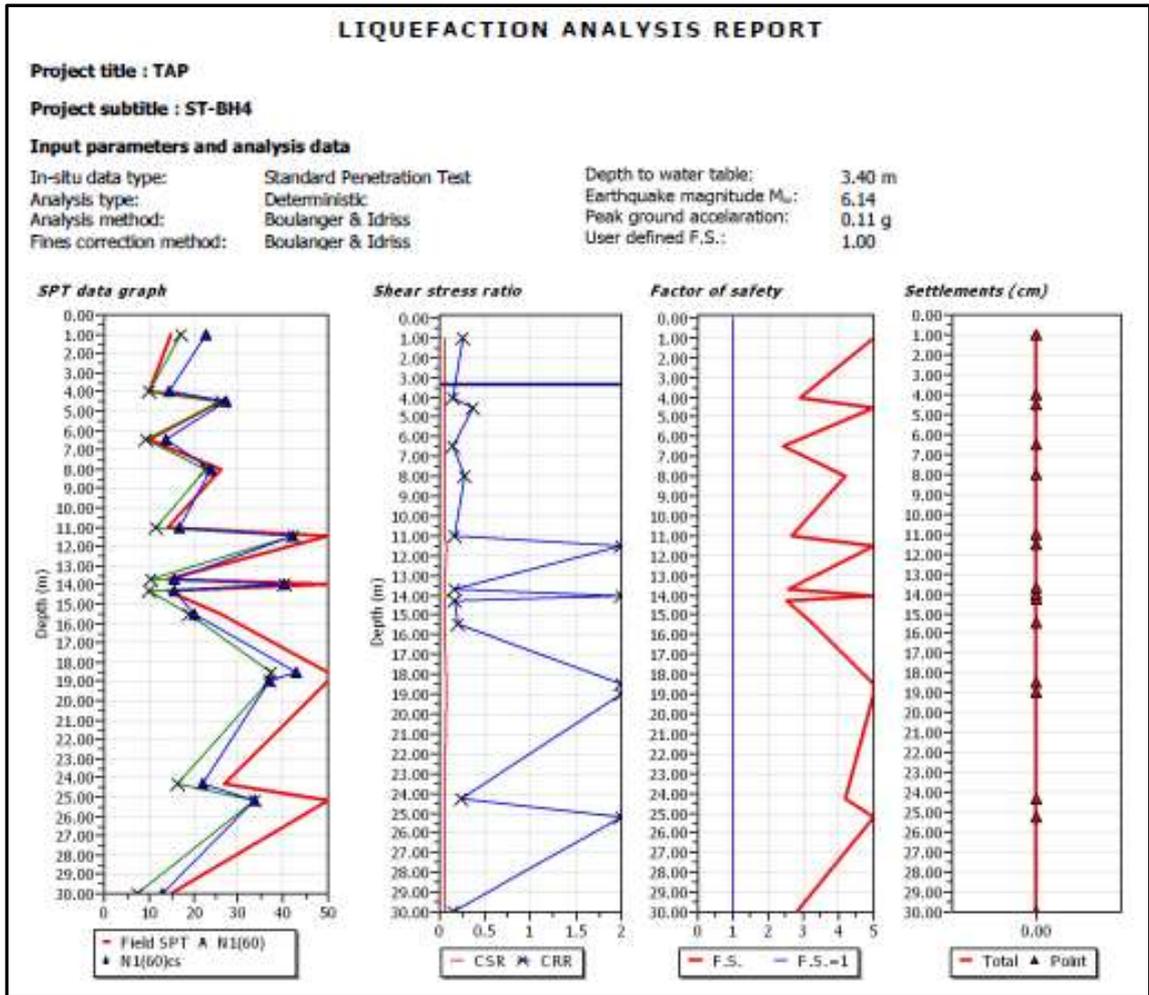


Figura 9-7: Rappresentazione sintetica della verifica alla suscettibilità alla liquefazione eseguita per il sondaggio ST-BH4

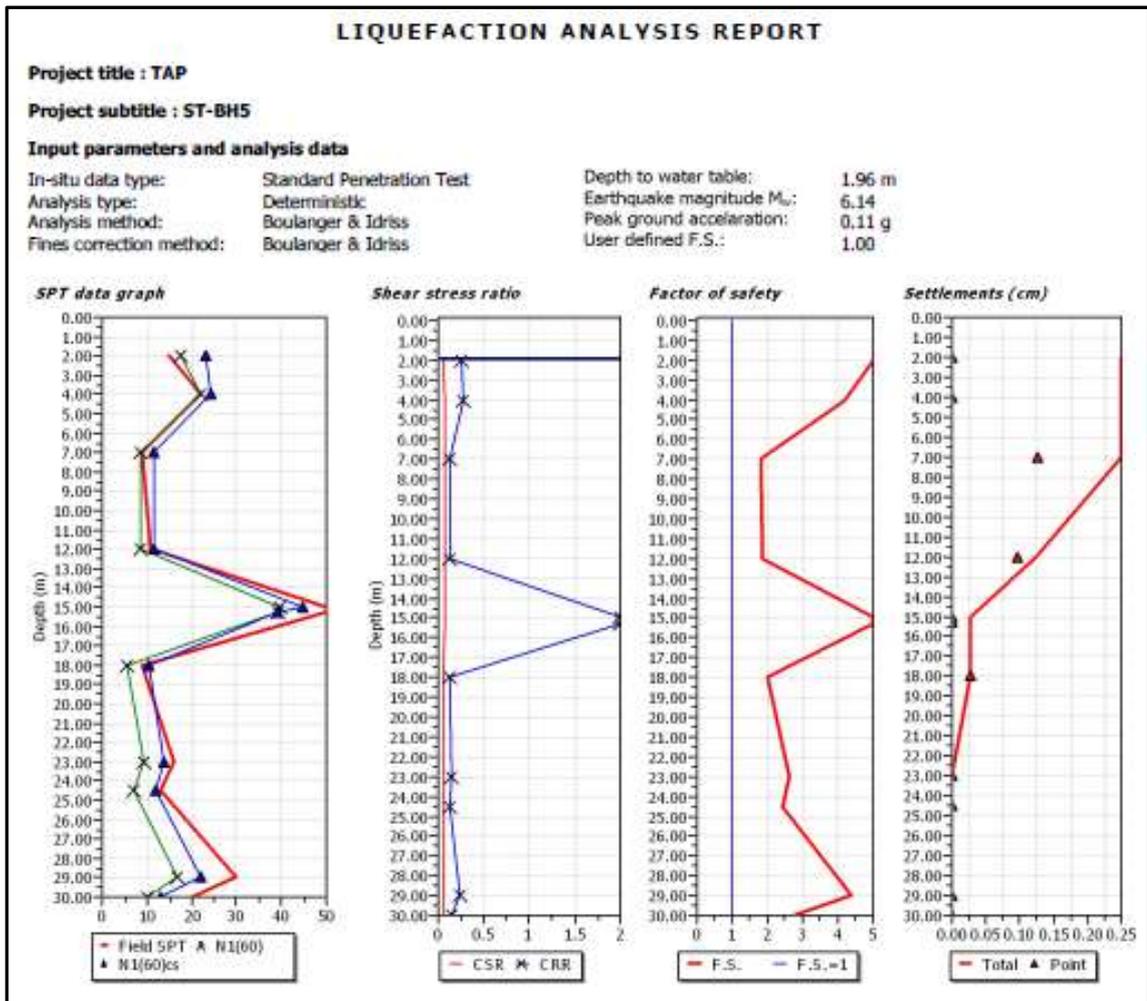


Figura 9-8: Rappresentazione sintetica della verifica alla suscettibilità alla liquefazione eseguita per il sondaggio ST-BH5

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	47 of 98

9.3 Risultati delle verifiche a liquefazione

Sono state effettuate le verifiche alla liquefazione utilizzando i dati provenienti dalle prove sismiche in foro e dai sondaggi a carotaggio continuo.

I risultati delle verifiche eseguite e illustrati nei due precedenti paragrafi, mostrano che i terreni attraversati, sottoposti alle azioni sismiche di progetto, non sono suscettibili a liquefazione.

In particolare, l'indice di liquefazione, calcolato in accordo con la formula proposta da Iwasaki (Rif. /14/) è uguale a 0 per tutte le verticali esaminate.

$$LPI = \int_0^{20m} F w(z) dz$$

essendo:

$$\begin{aligned}
 F &= 1 - FS && \text{con } FS \leq 1 \\
 F &= 0 && \text{con } FS > 1 \\
 W(z) &= 10 - 0,5 z && \text{con } z = \text{profondità in metri}
 \end{aligned}$$

Inoltre, si sono eseguite ulteriori verifiche, analizzando i dati emersi dallo Studio Sismico del tratto offshore della condotta (Rif. /27/) che considerano spettri di accelerazione con tempi di ritorno fino a 10000 anni.

I valori di PGA attesi in prossimità della linea di costa, sono pari a 0,182 g

Le analisi mostrano che, anche considerando queste situazioni estreme, i terreni attraversati non risultano suscettibili a liquefazione (LPI = 0) .

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	48 of 98

10 VERIFICA DEL POTENZIALE DI FRANA INDOTTA DA SISMA

10.1 Scopo della verifica

Lo scopo di questo capitolo è di verificare la stabilità dei terreni nella sezione interessata dal microtunnel considerando la contemporaneità tra sisma di progetto e le condizioni idrogeologiche più cautelative corrispondenti ad eventi meteorologici estremi (considerando il livello di falda prossimo al piano campagna).

Tale analisi consente di identificare i settori a minore stabilità e di evidenziare l'eventuale presenza di potenziali criticità che possano coinvolgere le profondità interessate dal passaggio del microtunnel.

10.2 Metodologia di verifica

Sono disponibili numerosi e consolidati metodi che permettono di valutare la stabilità di un versante in base al valore minimo tra i coefficienti di sicurezza calcolati lungo tutto il versante come rapporto tra la resistenza al taglio, mobilitabile lungo ogni superficie di potenziale scivolamento, e le tensioni tangenziali indotte dalla gravità e da eventuali ulteriori forze destabilizzanti, quali quelle introdotte dai terremoti e dalle oscillazioni della falda.

Come descritto nei successivi paragrafi 10.4, 10.5 e 10.6, le condizioni morfologiche e stratigrafiche non mettono in discussione la stabilità dell'area in condizioni normali, pertanto non si ritiene significativo effettuare analisi in condizioni statiche (in assenza di carico sismico) seppure in presenza della falda ipotizzata in prossimità del piano campagna.

L'analisi viene quindi eseguita in condizioni pseudo-statiche utilizzando il software descritto nel successivo paragrafo.

Le assunzioni per le analisi in condizioni pseudo-statiche sono le seguenti:

- il terreno è assimilabile ad un mezzo rigido perfettamente plastico;
- la rottura sia raggiunta contemporaneamente in tutti i punti della superficie di scorrimento (effettiva o potenziale);
- la resistenza sulla superficie di scorrimento è espressa in termini di tensioni efficaci, mediante il criterio di Mohr-Coulomb ($\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \phi'$, dove σ'_n è la tensione normale efficace sulla superficie di scorrimento);
- l'azione dinamica del terremoto è rappresentata da una forza di inerzia statica equivalente, proporzionale al peso W della massa potenzialmente instabile. Le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come $F_h = K_h W$ e $F_v = K_v W$, con K_h e K_v rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale.

Il presente studio è stato condotto utilizzando alcuni tra metodi di verifica della stabilità dei versanti più comunemente in uso. Sono stati scelti quelli di Janbu (corrected), Fellenius (ordinary), Bishop (simplified), Spencer e di GLE1 / Morgenstern-Price.

I risultati ottenuti con ogni metodo sono stati correlati per verificare la reciproca congruenza in particolare nell'identificare l'area più critica e per valutare l'ordine di grandezza del coefficiente di sicurezza.

¹ GLE= Global Limit Equilibrium associato al metodo di Morgenstern-Price classico dal programma SLIDE 6.0 di Rock Science utilizzato per le verifiche

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	49 of 98

10.3 Software utilizzato

Slide 6.0 è un programma, prodotto da Rocscience, che effettua i calcoli per la verifica della stabilità dei versanti su un modello bidimensionale; consente la valutazione della stabilità su superfici di rottura circolari e non circolari analizzando le potenziali superfici di scorrimento secondo la maggior parte dei metodi di calcolo all'equilibrio limite (tra cui i metodi precedentemente citati).

Il programma consente di analizzare singole superfici di scorrimento o di individuare la superficie di scivolamento più critica per un dato pendio. Imponendo i limiti superiore ed inferiore del versante da studiare il programma genera e valuta il fattore di sicurezza per le superfici di scorrimento comprese entro tali limiti. In questo caso i limiti del versante sono stati posti agli estremi della sezione di verifica.

Per non appesantire la restituzione grafica dei calcoli si è imposto di non evidenziare graficamente le superfici di scorrimento con fattore di sicurezza superiore a 3.

Negli elaborati grafici allegati al presente studio sono evidenziati i centri di rotazione delle superfici circolari con cui ogni superficie di scorrimento interseca la superficie topografica; tali centri e le relative le superfici di scorrimento sono evidenziate in base ad una scala cromatica dei fattori di sicurezza.

Nei medesimi elaborati grafici la superficie con minimo fattore di sicurezza globale è evidenziata con il relativo valore del fattore di sicurezza.

10.4 Quadro geomorfologico dell'area

L'area interessata dal microtunnel è caratterizzata da una superficie topografica blandamente ondulata che scende in debole pendenza verso la riva del mare; un breve tratto di spiaggia raccorda la costa al fondale marino. Questo scende con pendenza debole e regolare fino alla zona di uscita del microtunnel dove l'acclività si accentua leggermente.

La morfologia della costa si configura in una sequenza di archi concavi verso il mare, scolpiti dall'erosione del moto ondoso e senza indizi di instabilità di origine gravitativa.

Il microtunnel attraversa una formazione calcarenitica stratificata in livelli a vario grado di cementazione; l'indagine geognostica ha riscontrato livelli sabbiosi incoerenti soprattutto negli strati più superficiali.

Le caratteristiche geotecniche dei terreni risultanti dalle prove di laboratorio o desumibili dalle prove in situ, in base a metodologie consolidate nella letteratura scientifica, consentono di escludere la possibilità che su tali morfologie, si verificano fenomeni di dissesto gravitativo in condizioni meteorologiche e sismiche normali.

10.5 Dati stratigrafici

La stratigrafia dei terreni interessati dal microtunnel è stata definita mediante una apposita campagna di indagine geognostica effettuata nel Giugno del 2015, i cui risultati sono stati raccolti nel documento "Geotechnical & Geophysical report" (vedi Rif. /26/)

I sondaggi ST-BH4 e ST-BH5 sono stati ritenuti maggiormente significativi per caratterizzare il presente studio in quanto ubicati all'interno della sezione di studio (vedi Figura 9-2).

I due sondaggi non sono correlabili nel dettaglio dei singoli livelli descritti nelle rispettive stratigrafie ma sono concordi nell'identificare entrambe la medesima formazione calcarenitica. Questa risulta caratterizzata dalla presenza della facies sabbiosa decisamente prevalente sui livelli calcarenitici, evidenziati come intercalazioni e segnalati per l'elevato livello di fratturazione.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	50 of 98

Per la finalità del presente studio, essenzialmente cautelative, è possibile ignorare la presenza dei livelli litoidi e considerare come terreno sciolto tutto lo spessore interessato dalla trivellazione.

10.6 Caratterizzazione geotecnica dei terreni

Durante la campagna geognostica è stato possibile prelevare alcuni campioni di terreno per effettuare delle prove di laboratorio e sono state effettuate numerose prove SPT per caratterizzare i terreni in situ.

L'allegato n 11 del Geotechnical & Geophysical report (Rif. /26/) riassume i risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni prelevati.

La seguente Tabella 10-1 riporta i parametri dei terreni significativi per le verifiche di stabilità, risultati dalle prove di laboratorio. Essendo disponibili dati derivati da un solo campione prelevato da uno dei sondaggi di riferimento, nella tabella sono stati riportati anche quelli derivati dai sondaggi meno prossimi al microtunnel ma comunque realizzati presso la linea in progetto sulla medesima formazione.

Tabella 10-1: Parametri geotecnici derivati da prove di laboratorio

SONDAGGIO	ST-BH1	ST-BH1	ST-BH2	ST-BH2	ST-BH4
Campione	C1	C2	C1	C6	C5
Quota testa campione dal p.c. (m)	1,60	3,00	2,00	14,50	28,00
Peso di volume (kN/m³)	21,83	18,42	15,96	18,7	18,15
Angolo di attrito (°)		34,37	35,05		34,51
Coesione (kPa)		11,54	12,29		14,85

L'allegato n 12 del Geotechnical & Geophysical report (Rif. /26/) riassume i risultati delle prove SPT eseguite.

La seguente

Tabella 10-2 riporta i valori di NSPT calcolati in base alle prove effettuate nei primi 10 m di entrambi i sondaggi di riferimento: ST-BH4 e ST-BH5.

I risultati delle prove SPT e delle indagini geofisiche mostrano che le caratteristiche dei terreni sono piuttosto uniformi e, nonostante locali inversioni, manifestano una tendenza al miglioramento con la profondità.

Pertanto, le medie dei parametri desunti dalle prove di laboratorio e in sito effettuate nei primi 10 metri di profondità possono essere cautelativamente considerate rappresentative dell'intero spessore di terreno esaminato.

La seconda parte della medesima tabella riporta i valori dell'angolo di resistenza al taglio valutati secondo diverse metodologie in funzione di ogni valore di NSPT rilevato. La media dei valori calcolata con diversi metodi è stata ulteriormente mediata per ottenere un parametro caratterizzante l'ammasso del terreno nel suo complesso.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	51 of 98

Tabella 10-2: Parametri geotecnici derivati da prove SPT eseguite nei primi 10 m dei sondaggi di riferimento.

SONDAGGIO	ST-BH5	ST-BH4	ST-BH5	ST-BH4	ST-BH5
SPT	SPT1	SPT1	SPT2	SPT2	SPT3
Quota dal p.c. (m)	3,00	5,00	6,30	8,30	9,00
Sottofalda	Si	Si	Si	Si	Si
Nspt	22	10	9	14	11
Metodologia di valutazione	ANGOLO DI RESISTENZA ALTAGLIO (°)				
R.B.S.	31,7	27,2	26,6	29,5	27,8
J.N.R.	32,6	30,0	29,7	31,2	30,3
De Mello	29,9	27,5	27,1	28,7	27,7
Owasaki & Iwasaki	34,2	29,1	28,4	31,7	29,8
Sowers	33,2	30,8	30,5	31,9	31,1
Peck Hanson & Thornburn	32,4	30,0	29,7	31,1	30,3
Meyerhof	32,2	28,8	28,3	30,5	29,2
Hatanaka & Uchida	36,9	32,4	31,8	34,7	33,0
Wolff	32,5	30,0	29,8	31,2	30,3
Valori medi	32,8	29,5	29,1	31,2	30,0
Media delle medie	30,5				

I valori dell'angolo di attrito definiti in laboratorio sono maggiori di 34° e la coesione intercetta ha valori superiori a 11 kPa.

Il peso di volume si attesta prevalentemente (valore modale) sull'ordine dei 18 kN/m³ seppure a differenti profondità.

L'angolo medio di resistenza al taglio risultante dalla prove SPT effettuate nei primi 10 m dal p.c. risulta essere di circa 30°.

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	52 of 98

Parametri caratteristici per la verifica di stabilità

Per le finalità del presente studio, considerando la presenza di terreni a prevalente comportamento granulare, ai fini della modellazione per la verifica di stabilità si caratterizza il terreno con i seguenti parametri conservativi:

- peso di volume = 18 kN/m³
- angolo di attrito = 30°
- coesione drenata = 0 kN/m²

10.7 Modello geometrico

I dati topografici per la costruzione del modello geometrico, sono stati derivati dal disegno di progetto (Rif. /23/).

Il livello della falda è stato modellato con un gradiente costante fino al livello medio del mare ed è stata portata in prossimità del piano campagna per simulare gli effetti di condizioni meteorologiche particolarmente critiche. Data l'elevata permeabilità dei terreni anche questa assunzione risulta cautelativa anche in occasione di piogge intense e prolungate.

Le seguenti Figura 10-1 e Figura 10-2 riportano, rispettivamente, il modello geometrico (con scala verticale ingrandita di circa 10 volte) e la sezione modellata in Slide 6.0.

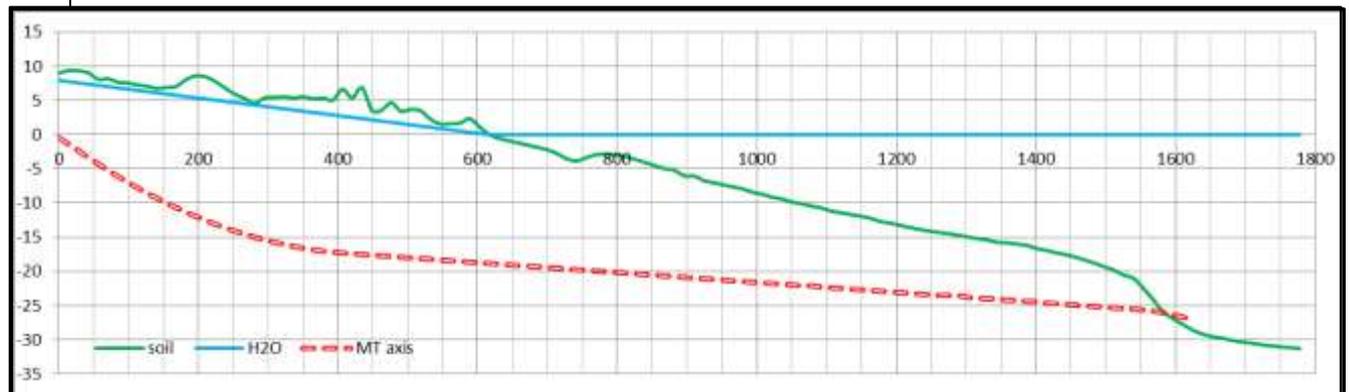


Figura 10-1: modello geometrico per la verifica di stabilità (scala verticale è ingrandita di circa 10 volte rispetto a quella orizzontale)

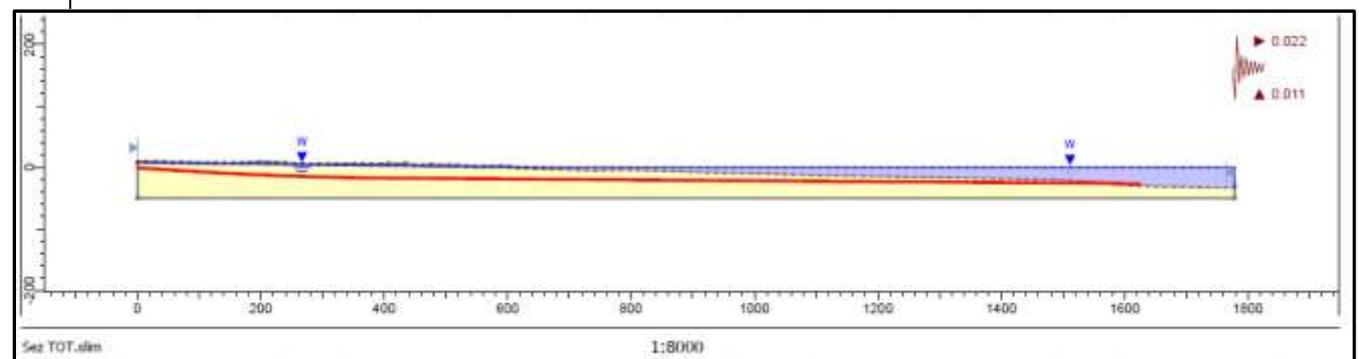


Figura 10-2: Sezione di verifica comparata alla sezione di progetto (fuori scala)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	53 of 98

10.8 Carico sismico

La caratterizzazione della sismicità dell'area (vedi capitoli 7 e 8) ha permesso di definire il sisma di progetto in base alla normativa attualmente vigente in Italia (NTC 2008; Rif. /2/).

I parametri sismici di riferimento sono i seguenti:

- Accelerazione al bedrock (a_g): 0,093 g
- Coefficiente stratigrafico (S_S): 1,2
- Coefficiente topografico (S_T): 1,0

Per l'analisi di stabilità dei pendii in condizioni pseudo-statiche, l'azione sismica è rappresentata da un'azione sismica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, la cui direzione è modulata da due coefficienti (K_h e K_v), calcolati come segue:

- Coefficiente orizzontale (K_h) = $\beta_s \times a_g(g) \times S_S \times S_T = 0,2 \times 0,093 \times 1,20 \times 1,00 = 0,022$
- Coefficiente verticale (K_v) = $\frac{1}{2} K_h = 0,011$

essendo β_s un coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito, il cui valore è suggerito dalla normativa (Tabella 7.11.I delle NTC 2008).

In accordo con quanto eseguito per la verifica del potenziale di liquefazione, si sono considerati anche gli spettri di accelerazione con tempi di ritorno fino a 10000 anni.

In questo caso, i valori di K_h e K_v attesi in prossimità della linea di costa, sono rispettivamente pari a 0,051 e 0,025

10.9 Risultati dell'analisi di stabilità

L'analisi di stabilità è stata effettuata valutando il fattore di sicurezza minimo tra 10 superfici circolari di potenziale scorrimento calcolate alle progressive ottenute dividendo la sezione di studio in 20 tratti poi ciascun tratto a metà per 10 volte iterativamente.

Considerando le finalità del presente studio si è imposto al programma di non tenere conto di eventuali superfici di scorrimento che interessino spessori di terreno inferiori ad 1 m.

Nella Tabella 10-3 sono riportati i minimi fattori di sicurezza calcolati con i metodi analitici elencati al paragrafo 10.7.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	54 of 98

Tabella 10-3: minimi fattori di sicurezza ottenuti con i vari metodi di analisi lungo la sezione di verifica.

	FATTORE DI SICUREZZA (FS)				
	Metodologia di analisi				
	Janbu corretta	Fellenius ordinario	Bishop semplificato	Spencer	Morgenstern Price
Progressiva (x)	FS	FS	FS	FS	FS
44,4739	7,58549	7,50313	7,53735	7,54103	7,54074
128,26	7,39599	7,24772	7,38636	7,38693	7,38656
212,046	6,51045	6,12925	6,57174	6,57152	6,57425
295,832	6,42827	6,12925	6,41224	6,41007	6,41104
379,618	2,29855	2,25599	2,28989	2,28832	2,28812
463,404	3,88186	3,51696	4,04949	4,05339	4,05323
547,19	5,16036	4,97403	5,15677	5,1569	5,15587
630,976	5,16036	4,97403	5,15677	5,1569	5,15587
714,762	6,30135	6,16558	6,28662	6,28486	6,28578
798,549	6,82819	6,67375	6,80851	6,80887	6,80883
882,335	7,16196	7,00563	7,148	7,14863	7,14861
966,121	7,30256	7,22569	7,25849	7,25751	7,25803
1049,91	7,09568	7,02119	7,05268	7,05172	7,05226
1133,69	6,79635	6,7248	6,75457	6,75376	6,75424
1217,48	6,36593	6,29796	6,32578	6,32511	6,32547
1301,27	5,76696	5,70676	5,73157	5,73165	5,73164
1385,05	4,86517	4,8139	4,83471	4,83479	4,83478
1468,84	3,45349	3,40241	3,41684	3,41684	3,41684
1552,62	3,40767	3,0582	3,26268	3,26096	3,26042
1636,41	4,54794	4,49512	4,51712	4,51722	4,51722

La Figura 10-3 correla graficamente i risultati della medesima tabella.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	55 of 98

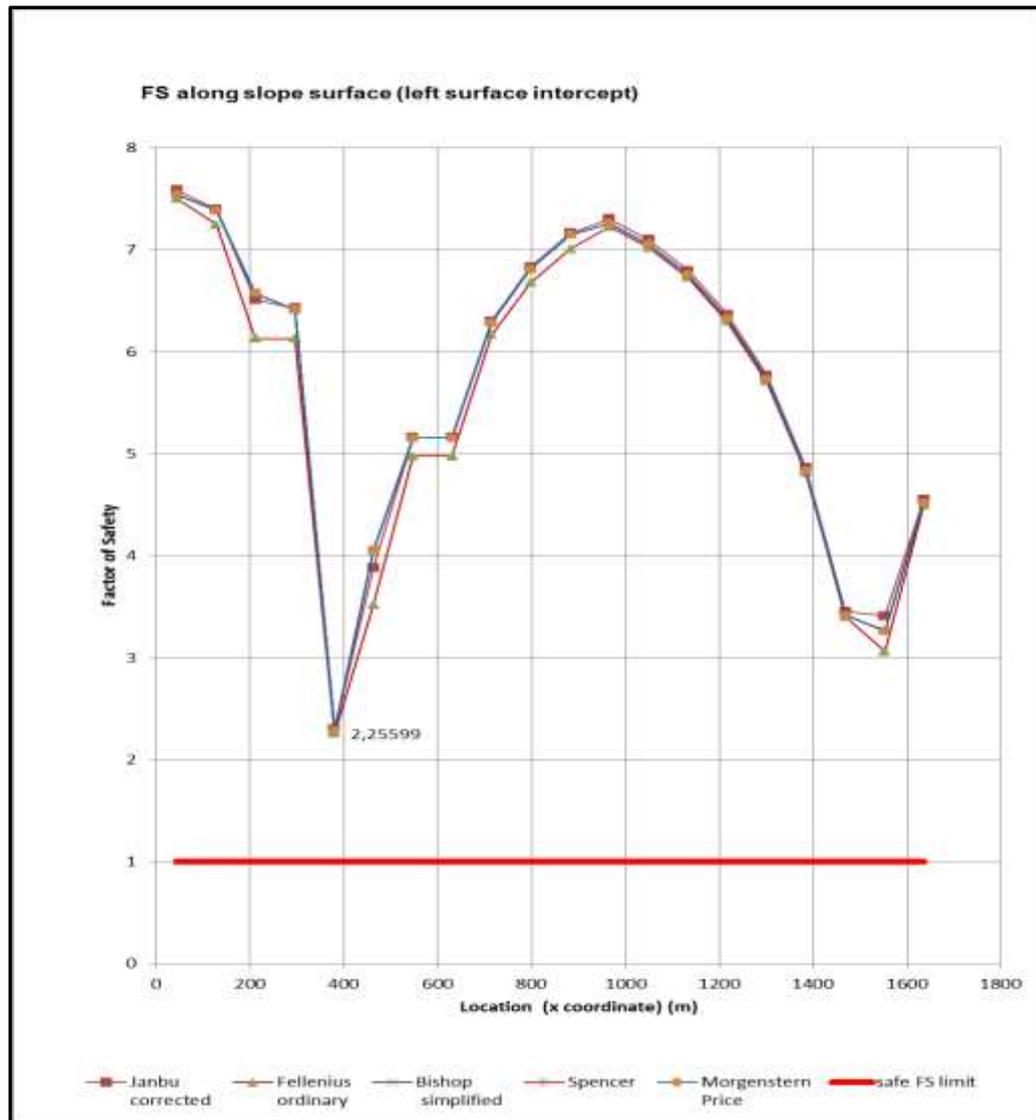


Figura 10-3: Correlazione grafica dei minimi coefficienti di sicurezza ottenuti con i vari metodi di analisi lungo la sezione di verifica

Dalla tabella e dal grafico si evidenzia che:

- i vari metodi utilizzati sono concordi sia nell'ordine di grandezza dei coefficienti di sicurezza sia nella loro distribuzione lungo il profilo;
- i minimi fattori di sicurezza sono molto superiori a quello che definisce la situazione di equilibrio tra le forze stabilizzanti e quelle destabilizzanti ($FS=1$; riga rossa nel grafico di Figura 10-3);
- il minimo fattore di sicurezza lungo tutta la sezione di verifica è sempre maggiore di 2 cioè il doppio di quello richiesto per l'equilibrio

Essendo state valutate oltre 6500 superfici per ogni metodo di verifica si è limitata la restituzione grafica alla sole superfici risultanti avere coefficienti di sicurezza inferiori a 3 (tre volte il valore di equilibrio).

Il metodo risultato più conservativo è quello di Fellenius pertanto viene presentata la restituzione grafica delle verifiche effettuate con tale metodo.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	56 of 98

La Figura 10-4 ed il suo ingrandimento in Figura 10-5 raffigurano, rispettivamente alla scala globale ed in dettaglio, l'area sottesa dalla superficie di scivolamento avente il minimo coefficiente di sicurezza con il relativo centro di rotazione.

Sono inoltre rappresentati gli archi ed i centri di rotazione relativi alle altre superfici aventi coefficienti di sicurezza minori di 3.

La scala cromatica in legenda consente di valutare il fattore di sicurezza relativo alle coppie arco centro. La coppia relativa al minimo globale è evidenziata con l'indicazione numerica del valore di FS.

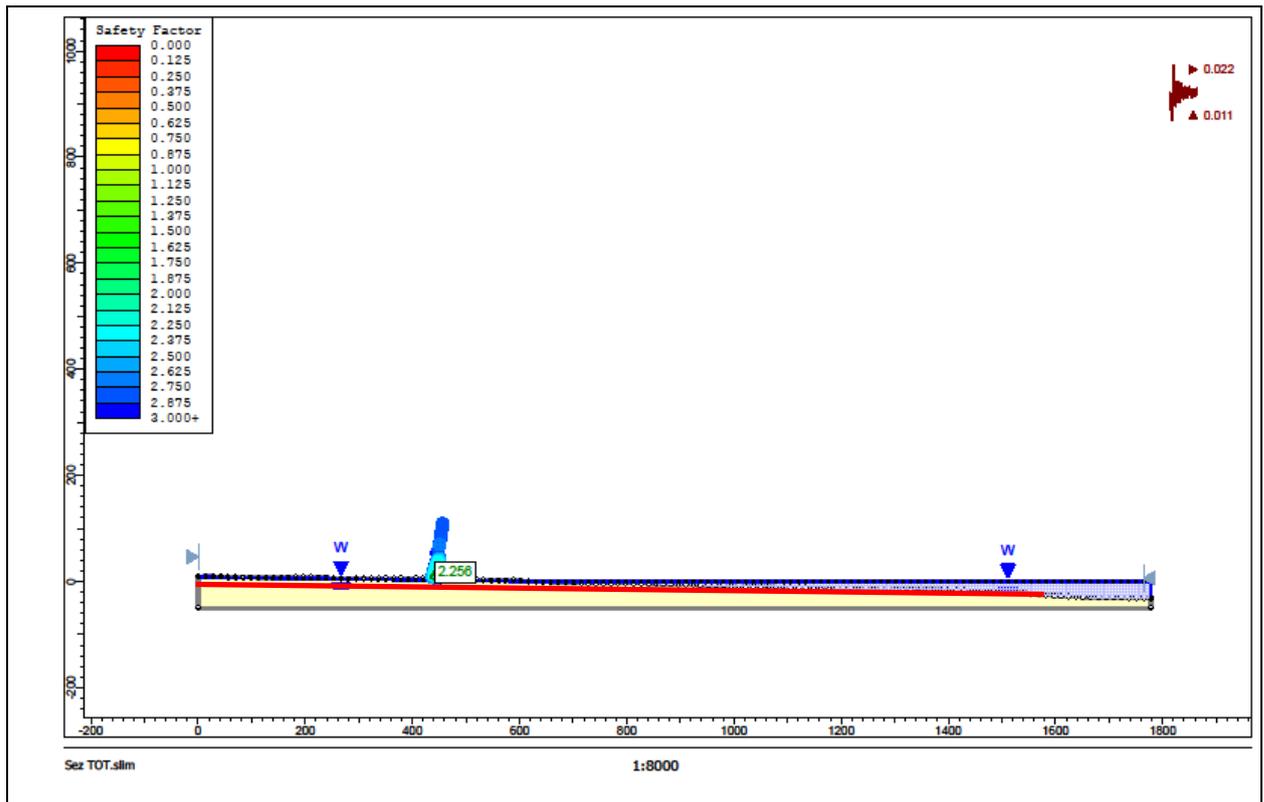


Figura 10-4: Sezione analizzata con indicazione della zona in cui il coefficiente di sicurezza risulta minimo (fuori scala).

Le successive Figura 10-6, Figura 10-7 e Figura 10-8 raffigurano gli archi di circonferenza verificati con il metodo di Fellenius e la posizione dei relativi centri di rotazione. Come si evince dal grafico in Figura 10-3 i vari metodi utilizzati forniscono risultati sostanzialmente omogenei, pertanto si ritiene superfluo allegare le relative restituzioni grafiche.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	57 of 98

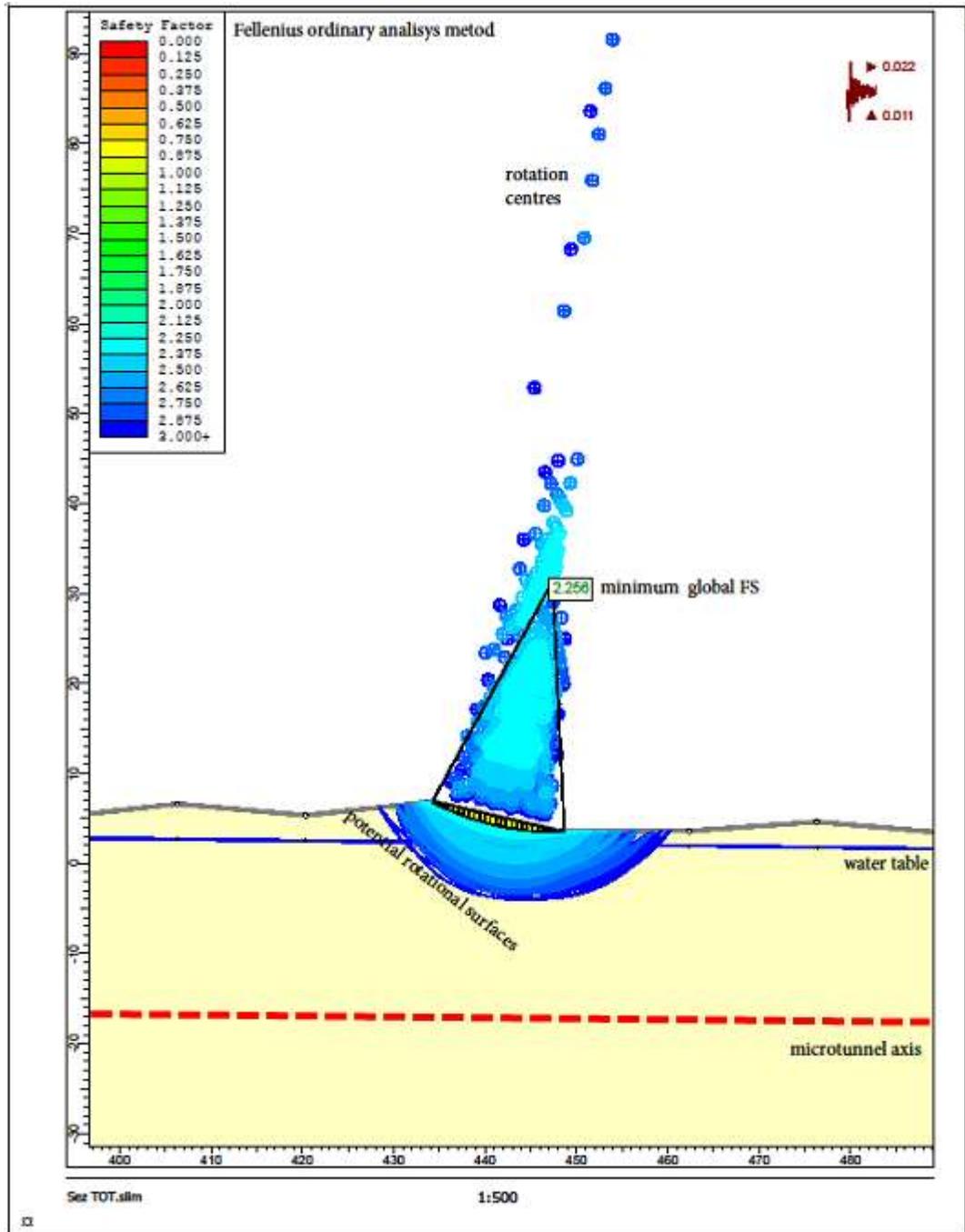


Figura 10-5: Ingrandimento della Figura 10-4. Superficie con il minor coefficiente di sicurezza e relativo centro di rotazione (fuori scala).

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	58 of 98

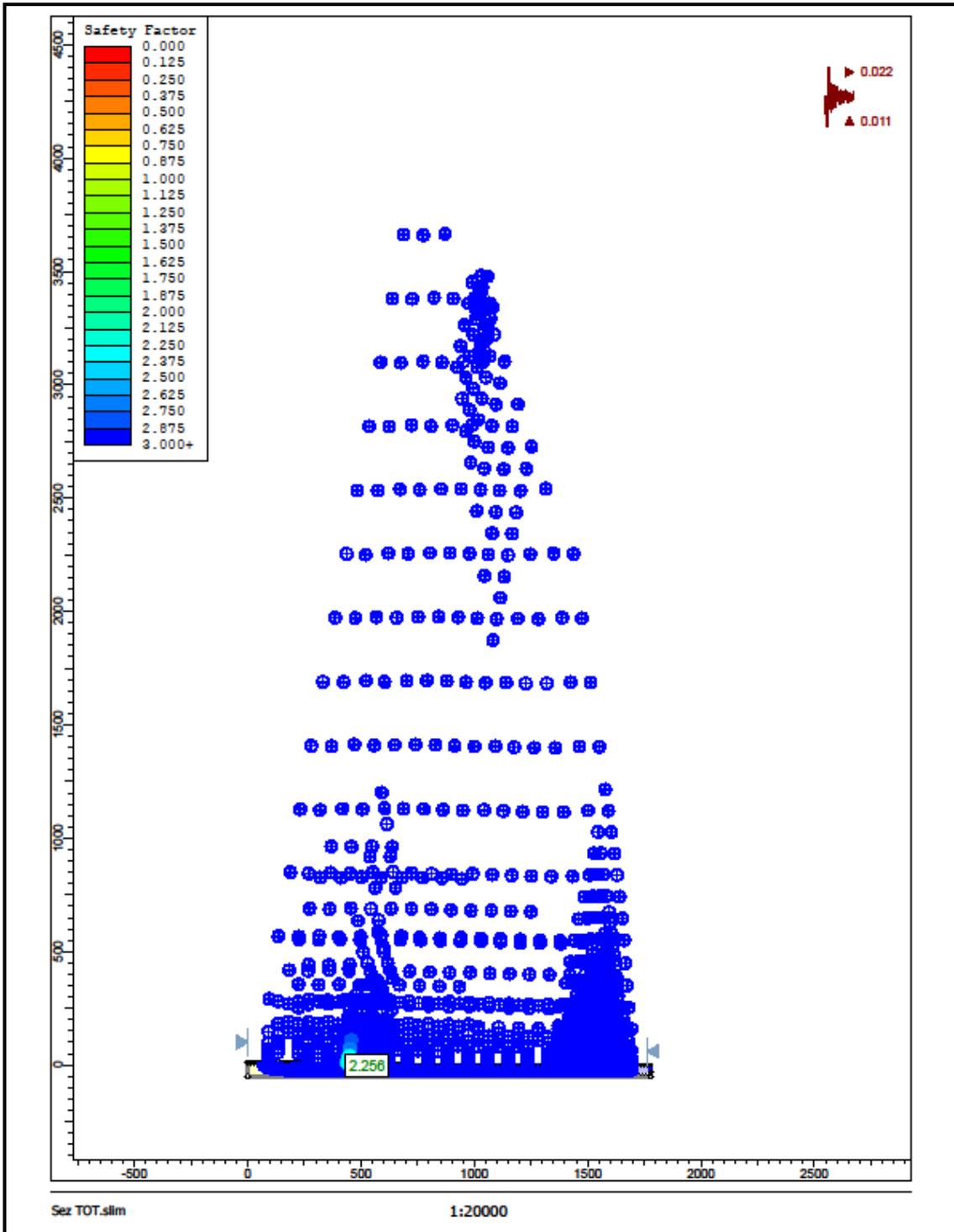


Figura 10-6: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius (fuori scala).

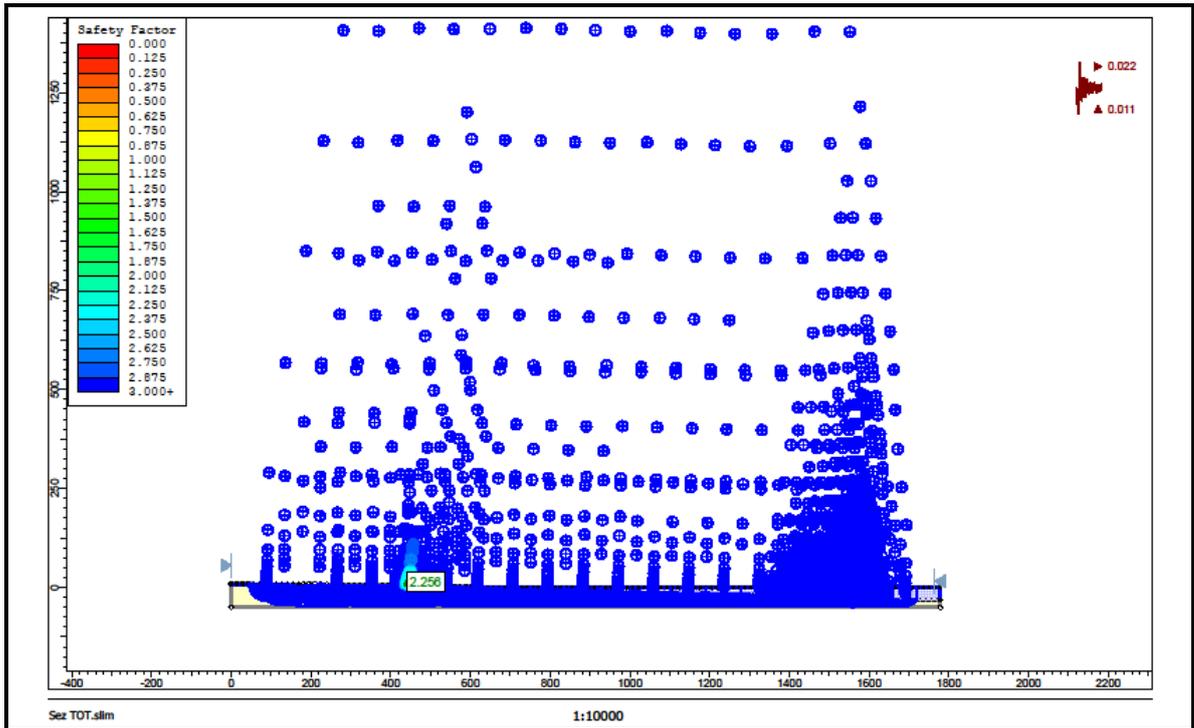


Figura 10-7: Ingrandimento della Figura 10-6

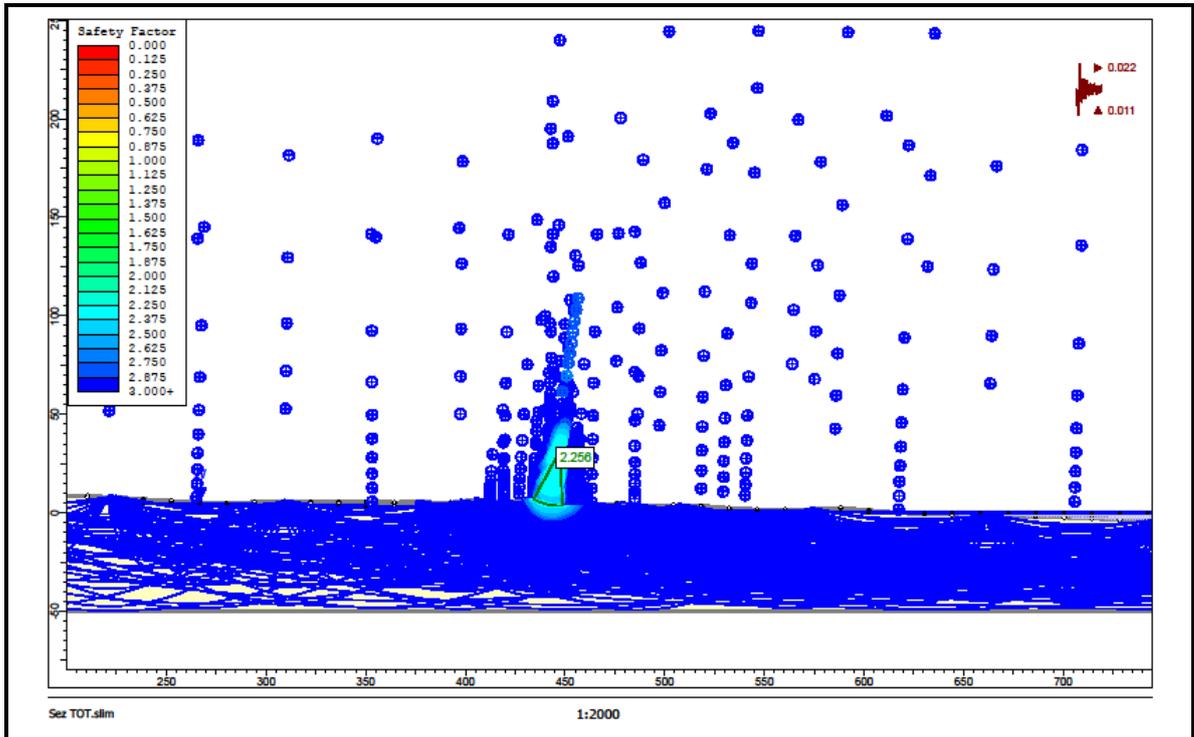


Figura 10-8: Ingrandimento della Figura 10-7.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	60 of 98

In conclusione:

- i valori dei coefficienti di sicurezza, calcolati lungo la sezione studiata attraverso analisi di stabilità eseguite con differenti metodi, variano tra 2,2 ed oltre 7.
- i risultati della modellazione numerica confortano la valutazione qualitativa della sostanziale stabilità del versante lungo tutto l'asse del microtunnel in progetto con margini di sicurezza sempre superiori al 200% anche in condizioni sismiche.
- la superficie critica emersa dalla modellazione numerica è stata verificata anche considerando le situazioni sismiche estreme (TR = 10000 anni) evidenziate dallo studio del tratto offshore (Rif. /27/). I risultati ottenuti confermano anche in questo caso margini di sicurezza attorno al 200% (vedi Figura 7 – Appendice 1)

In Appendice 1 sono forniti, in originale, gli elaborati grafici riportati fuori scala nelle immagini del presente capitolo e la informazioni di output del software di calcolo.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	61 of 98

11 VERIFICA DELLA RISPOSTA DEL MICROTUNNEL ALLO SCUOTIMENTO

11.1 Generalità

La valutazione delle azioni indotte da un sisma su una struttura ad elevato sviluppo lineare è estremamente complessa, poiché è caratterizzata da un'estesa area d'influenza, in genere integrata in un sistema (rete) ben più ampio rispetto a quanto si verifica, ad esempio, per gli edifici o per altre strutture indipendenti.

Alle difficoltà connesse alla schematizzazione di un sistema complesso si deve poi aggiungere la necessità di portare in conto l'azione del terreno circostante, da cui non è possibile prescindere ai fini di un'attendibile valutazione della risposta dinamica del Microtunnel.

11.1.1 Il moto sismico nel terreno

I terremoti sono causati da un improvviso rilascio di energia all'interno della crosta terrestre e si manifestano come scuotimento del terreno.

L'energia liberatasi nel sottosuolo durante un evento sismico si propaga in ogni direzione verso la superficie terrestre sotto forma di onde elastiche.

Alla sorgente si hanno le onde di volume che si possono distinguere in due tipi:

- Le onde P (vedi Figura 11-1) o di pressione (pressure wave) sono le più veloci. Si propagano come le onde sonore nell'aria, fanno oscillare le particelle di terreno che attraversano parallelamente alla loro direzione di propagazione causando compressioni e dilatazioni del mezzo. Mostrano piccole ampiezze e bassi periodi, hanno un potenziale di danneggiamento relativamente basso.

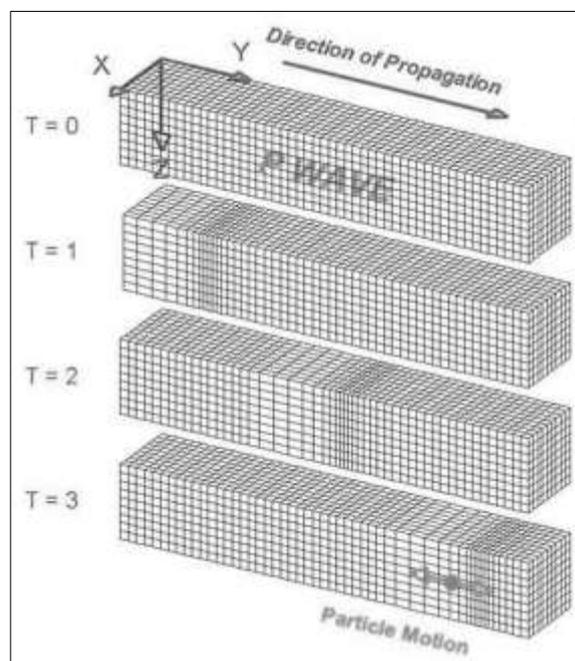


Figura 11-1: Onde di volume, onde P

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	62 of 98

- Le onde S (vedi Figura 11-2) o di taglio (shear wave) viaggiano più lentamente delle P. L'oscillazione delle particelle di terreno che attraversano avviene trasversalmente alla loro direzione di propagazione. Non causano variazioni di volume e non possono propagarsi nei fluidi. Il loro moto può essere separato nelle componenti orizzontale (SH) e verticale (VH). Mostrano grandi ampiezze e periodi modesti, hanno un potenziale di danneggiamento significativo.

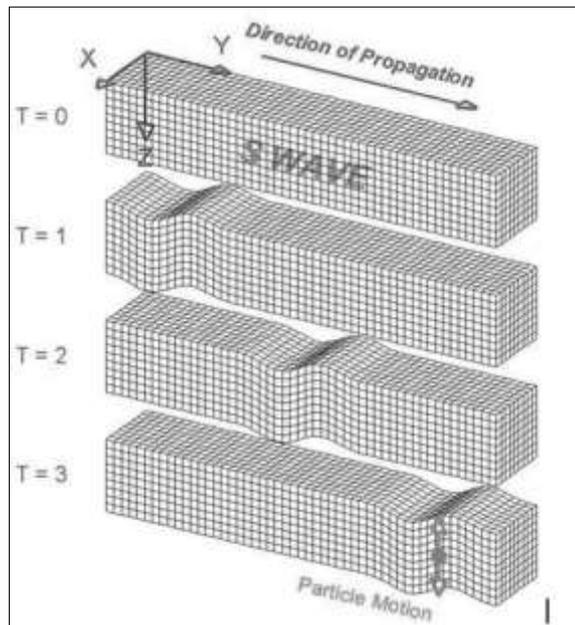


Figura 11-2: Onde di volume, onde S

Quando le onde di volume intercettano la superficie terrestre, si formano le onde di superficie. Queste onde sono più lente delle onde di volume ed inducono generalmente grandi spostamenti. Sono maggiormente individuabili nel caso di terremoti superficiali e comunque al crescere della distanza dall'epicentro.

Le onde di superficie si possono distinguere in due tipi:

- Le onde di Love (onde L; Figura 11-3) sono generate dalle onde SH (componente orizzontale delle onde S). Il moto è orizzontale e perpendicolare alla direzione di propagazione. Hanno grandi ampiezze e lunghi periodi.
- Le onde di Rayleigh (onde R; Figura 11-4) sono generate dalle onde P e SV (componente verticale delle onde S). Il moto delle particelle di terreno avviene in senso antiorario su una ellisse il cui asse maggiore è perpendicolare alla superficie del terreno. Hanno grandi ampiezze.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	63 of 98

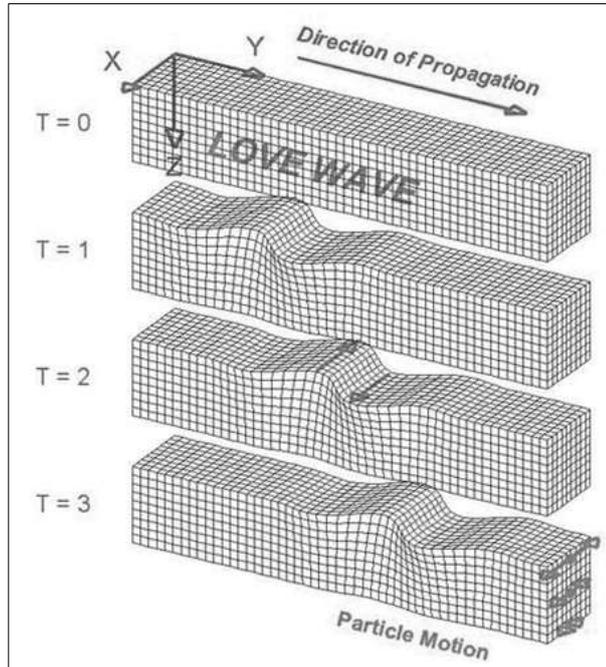


Figura 11-3: Onde di Love

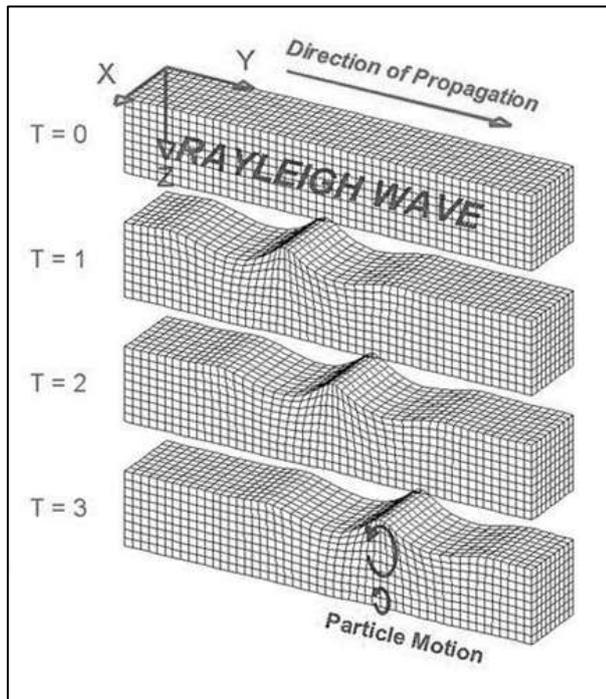


Figura 11-4: Onde di Rayleigh

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	64 of 98

11.1.2 Deformazioni sul tunnel

La risposta del microtunnel allo scuotimento sismico, quindi al movimento del terreno, può essere descritta in termini di due principali tipi di deformazione (Rif. /18/): la deformazione assiale e la curvatura.

Questi due tipi di deformazione si sviluppano in un tunnel quando l'onda sismica si propaga parallelamente o obliquamente all'asse. La Figura 11-5 rappresenta i suddetti tipi di deformazione.

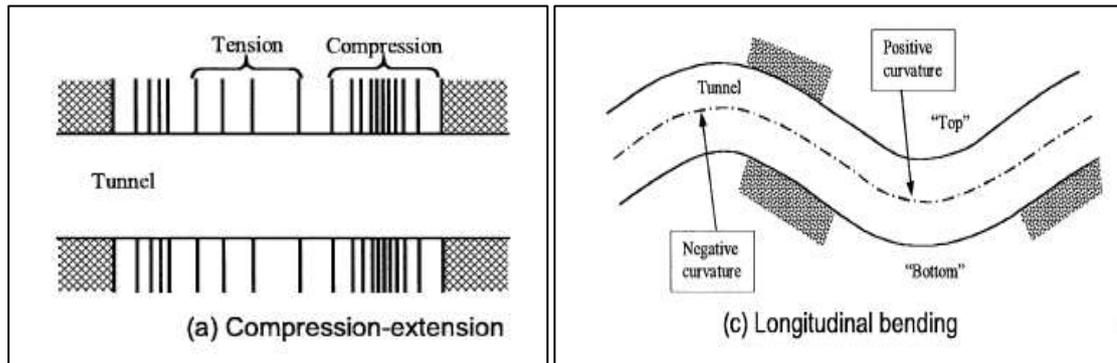


Figura 11-5: Deformazione assiale e curvatura

Il comportamento generale del tunnel è assimilato a quello di una trave elastica soggetta a tensioni e deformazioni imposte dal terreno circostante.

11.1.3 Risposta del tunnel alle deformazioni del terreno

In questo paragrafo vengono presentati i metodi con cui sono state determinate le massime deformazioni del microtunnel in conseguenza al moto del terreno.

I metodi utilizzati sono i seguenti:

- Metodo "free field" (Rif. /20/ e /15/)
- Metodo "soil tunnel interaction" (Rif. /16/ e /19/)

L'intensità del movimento del terreno dovuto al terremoto è stato descritto principalmente tramite i seguenti fattori:

- PGV: peak ground velocity, è la massima velocità del suolo attraversato dall'onda sismica.
- PGA: peak ground acceleration, è la massima accelerazione del suolo attraversato dall'onda sismica.
- Vs: velocità effettiva dell'onda sismica nella sua direzione di propagazione.

Nel paragrafo 11.2 sono verificate le deformazioni nel calcestruzzo del tubo di protezione nella condizione di sollecitazione sismica a compressione.

Nel paragrafo 11.3 sono illustrate le verifiche a deformazione del giunto nella condizione di sollecitazione sismica a trazione.

Per tali verifiche sono state considerate solo le onde S in quanto trasportano molta più energia rispetto alle onde di tipo P e tendono a generare spostamenti del terreno più grandi.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	65 of 98

11.2 Verifica delle deformazioni nella configurazione di compressione

11.2.1 Metodo "Free Field"

Un metodo semplificato per valutare la risposta di un tunnel alle deformazioni del terreno dovute al passaggio di un'onda sismica fu proposto da Newmark (Rif. /17/).

Questo approccio è basato sulla teoria della propagazione di un'onda in un mezzo omogeneo, elastico ed isotropo.

Le deformazioni del terreno sono calcolate assumendo la propagazione di un'onda armonica che si propaga con un angolo di incidenza rispetto all'asse della struttura in esame.

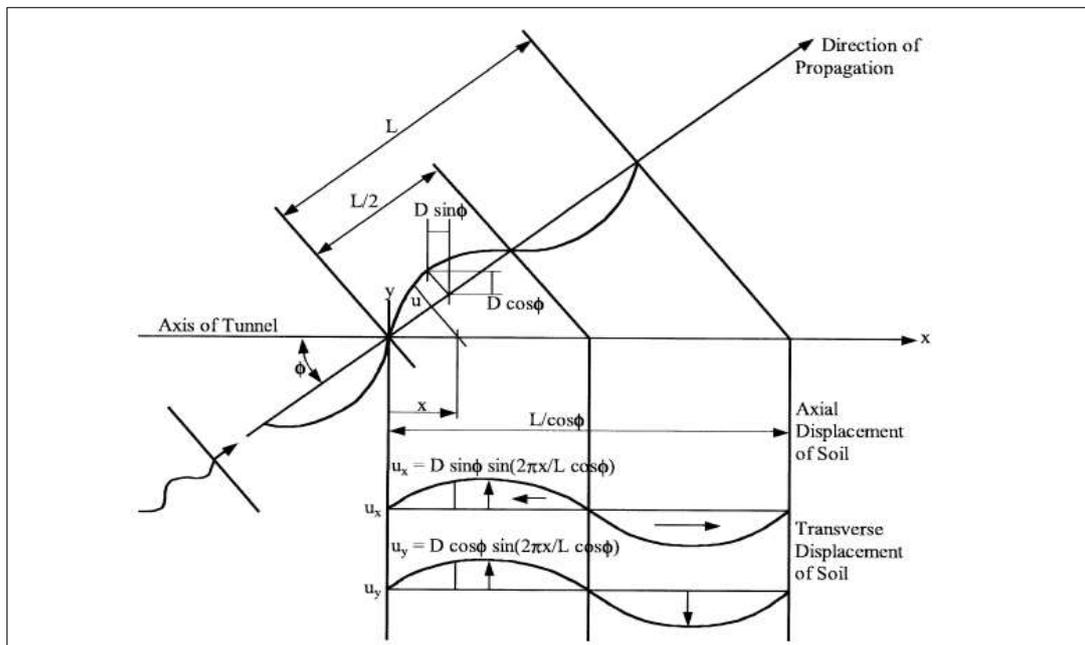


Figura 11-6: Geometria di un'onda S sinusoidale obliqua all'asse del tunnel

La *Figura 11-6* rappresenta le deformazioni free field del terreno lungo l'asse del tunnel dovute ad un'onda S sinusoidale con una lunghezza d'onda L , un'ampiezza D ed un angolo di incidenza ϕ considerato rispetto l'orizzontale. Spesso si assume conservativamente l'angolo di incidenza più critico e quindi il valore di deformazione maggiore.

Usando questo metodo semplificato le deformazioni assiali e la curvatura dovuta alle onde S possono essere espresse in funzione dell'angolo di incidenza come mostrato in *Tabella 11-1*.

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	66 of 98

Tabella 11-1: Deformazioni per metodo free field

TIPO D'ONDA		DEFORMAZIONE LONGITUDINALE (ASSIALE)	CURVATURA
Onde S	Forma generale	$\varepsilon = \frac{PGV}{V_s} \sin\varphi * \cos\varphi$	$K = \frac{PGA}{V_s^2} \cos^3 \varphi$
	Valore massimo	$\varepsilon_{max} = \frac{PGV}{2V_s} \text{ per } \varphi = 45^\circ$	$K_{max} = \frac{PGA}{V_s^2} \text{ per } \varphi = 0^\circ$

Nelle formule precedenti il termine $PGV * \sin \varphi$ rappresenta la componente di velocità del suolo parallela all'asse del tunnel ed il termine $PGV / \cos \varphi$ rappresenta la velocità apparente di propagazione dell'onda nella direzione dell'asse del tunnel.

Quando si usano queste equazioni si assume che il tunnel subisca le stesse deformazioni del terreno in condizioni free field, quindi la presenza del tunnel è ignorata.

Questo metodo approssimato fornisce una stima per eccesso delle deformazioni indotte alla struttura dall'onda viaggiante.

Per il microtunnel in esame i dati d'input sono:

- $PGV = 0,114 \text{ m/s}$
- $PGA = 0,112 \text{ g}$
- $V_s = 450 \text{ m/s}$
- Angolo di incidenza $\varphi = 45^\circ$

Il valore combinato della deformazione assiale massima e della curvatura si ricava dalla formula seguente:

$$\varepsilon_{ab} = \pm \frac{PGV}{V_s} * \sin \varphi * \cos \varphi \pm \frac{PGA * r}{V_s^2} \cos^3 \varphi$$

dove r è il raggio del tunnel.

$$\varepsilon_{ab} = \pm 0,000129 = \pm 1,29 * 10^{-4}$$

Si deve confrontare questo valore con la deformazione ammissibile a compressione del calcestruzzo che, secondo quanto prescritto dalle NTC 2008 (Rif. /2/) al paragrafo 4.1.2.1.2.2, risulta pari a:

$$\varepsilon_{cu} = 0,35\% = 0,0035 = 3,5 * 10^{-3}$$

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	67 of 98

La verifica risulta soddisfatta nonostante siano state assunte condizioni di cinematismo estremamente penalizzanti (deformazione del tunnel uguale a quella del terreno circostante) che in certi casi (ad esempio in presenza di terreni estremamente deformabili) potrebbero richiedere un codice di calcolo più affinato.

Infatti, considerando l'ipotesi posta alla base della verifica, il metodo è tanto più pertinente quanto più le rigidezze del terreno e del calcestruzzo sono di entità confrontabile, pertanto il metodo è :

- *pertinente per un tunnel* in roccia o in terreni molto rigidi. In questo caso è ragionevole assumere che il tunnel si deformi come il terreno circostante.
- *meno pertinente per tunnel in terreni soffici*, sotto queste condizioni le deformazioni del terreno calcolate potrebbero essere troppo elevate per la struttura rigida del tunnel, non essendo quindi più realistiche.

In questo secondo caso non è più possibile ignorare la presenza del tunnel nel terreno, risulta quindi necessario l'utilizzo di un metodo che tenga conto dei differenti valori dei moduli di deformabilità del terreno e del calcestruzzo rispettivamente.

Pur essendo l'analisi verificata con il metodo "free field", si è eseguita, a titolo di completezza, anche un'analisi con il metodo "soil - tunnel interaction" che verrà esposta nel paragrafo successivo.

Inoltre, la verifica è stata effettuata anche con riferimento allo studio sismico della parte offshore (Rif. /27/), che considera un sisma con tempi di ritorno di 10000 anni.

Il valore combinato della deformazione assiale massima e della curvatura è pari a $\pm 2,52 \cdot 10^{-4}$ e quindi anche in queste condizioni sismiche estreme la verifica risulta soddisfatta.

11.2.2 Metodo "soil - tunnel interaction"

Quando il tunnel può considerarsi rigido nella sua direzione longitudinale, rispetto al terreno circostante, esso resiste, piuttosto che conformarsi, alle deformazioni imposte dal terreno.

Per configurare la risposta del tunnel è quindi necessario l'utilizzo di un metodo che consideri sia la rigidezza del tunnel che quella del terreno.

Un metodo semplificato è stato proposto da Kuribayashi, et al. e da St. Jhon, et al (Rif. /16/ e /19/).

In generale il sistema tunnel-terreno è simulato come una trave su suolo elastico, con la teoria di onda che si propaga in un mezzo elastico, omogeneo ed isotropo.

Quando il tunnel è soggetto alle deformazioni assiali e alla curvatura causate dall'onda sismica che si propaga nel terreno, subirà le seguenti forze sezionali (vedi Figura 11-7):

- Forza assiale Q, nella sezione trasversale dovuta alla deformazione assiale
- Momento flettente M e forza di taglio V, nella sezione trasversale dovuti alla curvatura.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	68 of 98

La massima deformazione assiale ε_{max}^a causata da un'onda con angolo di incidenza pari a 45° può essere ottenuta tramite la seguente formula:

$$\varepsilon_{max}^a = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right) * D_a}{2 + \frac{E_l A_c}{K_a} * \left(\frac{2\pi}{L}\right)^2}$$

dove:

L = Lunghezza d'onda dell'onda S sinusoidale ideale.

K_a = Coefficiente di rigidezza longitudinale del mezzo.

D_a = Ampiezza dello spostamento del terreno associato alla deformazione assiale free field.

A_c = Area della sezione trasversale.

E_l = Modulo elastico del calcestruzzo del rivestimento del tunnel.

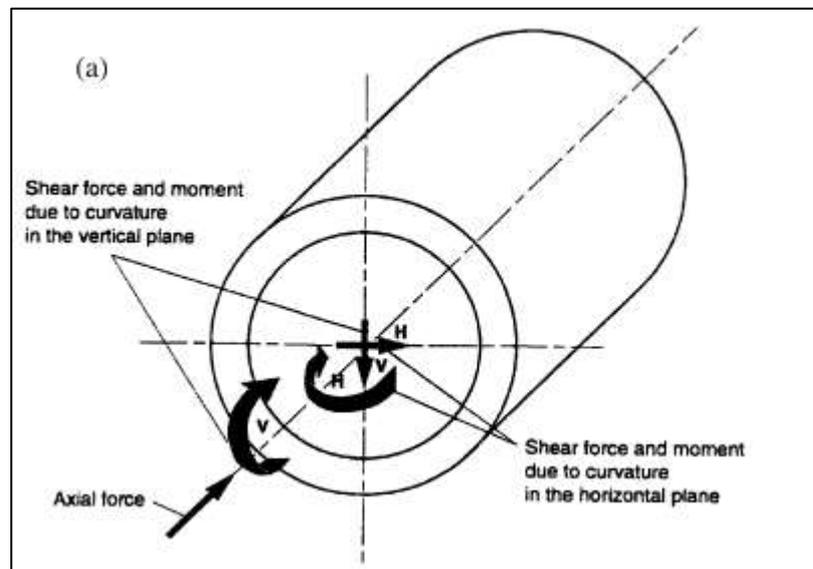


Figura 11-7: Forze dovute alla curvatura e alla deformazione assiale

La forza d'attrito massima che può essere sviluppata tra il rivestimento del tunnel e il terreno limita la deformazione assiale del rivestimento. Questa massima forza d'attrito $(Q_{max})_f$, che è quindi pari alla massima forza assiale Q_{max} , può essere calcolata nel seguente modo:

$$Q_{max} = (Q_{max})_f = \frac{fL}{4} = E_l A_c \varepsilon_{max}^a$$

dove f è la forza d'attrito (per unità di lunghezza del tunnel) tra terreno e rivestimento del tunnel.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	69 of 98

La massima deformazione flessionale causata da un'onda S con angolo di incidenza di 0° è:

$$\varepsilon_{max}^b = \frac{\left(\frac{2\pi}{L}\right)^2 * D_b}{1 + \frac{E_l I_c}{K_t} * \left(\frac{2\pi}{L}\right)^4} * r$$

dove:

I_c = Momento di inerzia della sezione circolare del tunnel.

D_b = Ampiezza dello spostamento del terreno per la curvatura free field

K_t = Coefficiente di rigidità trasversale del mezzo.

r = Raggio del tunnel.

Il momento flettente associato alla deformazione flessionale è pari a:

$$M_{max} = \frac{E_l I_c \varepsilon_{max}^b}{r}$$

La forza di taglio massima è pari a:

$$V_{max} = M_{max} * \left(\frac{2\pi}{L}\right)$$

Questa forza di taglio deve essere confrontata con la resistenza a taglio del calcestruzzo che si verifica durante il massimo terremoto di progetto.

La resistenza a taglio viene calcolata secondo quanto prescritto dalle norme tecniche delle costruzioni del 2008, (Rif. /2/) nel paragrafo 4.1.2.1.3.1, assunta cautelativamente uguale al valore minimo pari a:

$$V_{c,RD} = v_{min} * b_w * d$$

Dove:

$$v_{min} = 0.035 * k^{3/2} * f_{ck}^{1/2}$$

$$k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$$

f_{ck} = resistenza a compressione caratteristica del calcestruzzo (**pari a 50 MPa**).

d = altezza utile della sezione, assunta pari a 250 mm.

b_w = larghezza minima della sezione.

Si noti che:

- L'effetto dell'interazione tunnel terreno nelle formule precedenti è esplicitamente tenuta in conto. La rigidità del terreno e quella del tunnel sono rappresentate rispettivamente dai coefficienti di rigidità K_a e K_t e dai moduli $E_c A_c$ o $E_c I_c$.
- L'applicazione di queste equazioni è necessaria solo quando il tunnel è costruito in terreni soffici. Per tunnel in roccia o terreni rigidi il metodo free field presentato in precedenza è generalmente soddisfacente.

Una stima della lunghezza d'onda può essere ottenuta con la seguente formula:

$$L = T * V_s$$

Dove T è il periodo naturale dell'onda di taglio che si sta propagando nel terreno dove è posto il tunnel e V_s è la velocità effettiva dell'onda sismica nella sua direzione di propagazione.

T può essere calcolato come il periodo di oscillazione del deposito di terreno (Rif. /20/):

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	70 of 98

$$T = \frac{4 * h}{V_s}$$

Dove h= altezza del deposito di terreno sopra il bedrock rigido.

L'ampiezza dello spostamento dell'onda S e quindi delle deformazioni del terreno per sforzo assiale e curvatura, può essere calcolata tramite le seguenti formule:

$$D_a = \frac{PGV * L}{V_s * 2\pi} * \sin\phi * \cos\phi$$

$$D_b = \frac{L^2 * PGA * g}{4\pi^2 * V_s^2} * \cos^3\phi$$

I coefficienti K_a e K_t possono essere ricavati dall'espressione suggerita da St. John e Zahrah (Rif. /19/):

$$K_a = K_t = \frac{16\pi * G_m * (1 - \nu_m)}{(3 - 4\nu_m)} * \frac{D}{L}$$

Dove:

G_m = il modulo di taglio del terreno calcolato come $G_m = \rho_m * V_s^2$, con ρ_m densità del terreno.

ν_m modulo di Poisson del terreno.

D = diametro del tunnel.

Questi coefficienti di rigidezza nello specifico rappresentano:

- il rapporto di pressione tra tunnel e terreno;
- Lo spostamento ridotto del terreno in presenza del tunnel.

Per il tunnel in esame i risultati sono quelli riportati in Tabella 11-2.

Tabella 11-2: Risultati ottenuti con metodo "soil tunnel interaction"

PERIODO NATURALE DELL'ONDA DI TAGLIO, T	0,267 S
Lunghezza d'onda, L	120 m
Modulo di taglio del terreno, G_m	381881 kN/m ²
Coefficiente di rigidezza del terreno $K_a = K_t$	167875 kN/m
Ampiezza dello spostamento del terreno associata alla deformazione assiale free field, D_a	$2,4 * 10^{-3}$ m
Ampiezza dello spostamento del terreno associata alla curvatura flessionale free field, D_b	$7 * 10^{-4}$ m
Massima deformazione assiale, ε_{max}^a	$3,6 * 10^{-5}$
Massima forza d'attrito $(Q_{max})_f$, = massima forza assiale Q_{max}	3386 kN
Massima deformazione flessionale, ε_{max}^b	$2,6 * 10^{-6}$
Massimo momento flettente, M_{max}	84 kN m
$\varepsilon^{ab} = \varepsilon_{max}^a + \varepsilon_{max}^b$	$3,8 * 10^{-5}$
Confronto con la deformazione ammissibile a compressione del calcestruzzo	$3,8 * 10^{-5} < 3,5 * 10^{-3}$ Verificata

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	71 of 98

Confrontando la deformazione ammissibile del calcestruzzo con il valore combinato della deformazione assiale massima e della curvatura, la verifica risulta soddisfatta.

Inoltre, la verifica è stata effettuata anche con riferimento allo studio sismico della parte offshore (Rif. /27/), che considera un sisma con tempi di ritorno di 10000 anni. Il valore combinato della deformazione assiale massima e della curvatura è pari a $7,41 * 10^{-5}$ e quindi anche in queste condizioni sismiche estreme la verifica risulta soddisfatta.

Per quanto riguarda la verifica a taglio nella sezione corrente del tubo di rivestimento in c.a. si sono ottenuti i seguenti risultati:

- Massima forza di taglio dovuta alla curvatura, $V_{max} = 4 \text{ kN}$.
- Resistenza a taglio del calcestruzzo, $V_{CRD} = 1368 \text{ kN}$.

Dato che $V_{max} < V_{rcd}$ la verifica risulta soddisfatta.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	72 of 98

11.3 Verifica a deformazione nella configurazione di trazione

Quando si analizza la risposta del tunnel soggetto ad una tensione di trazione (generalmente corrispondente alla fase di dilatazione del terreno in seguito al passaggio dell'onda sismica) occorre considerare che il tunnel non è continuo, ma diviso in conci.

È necessario quindi controllare lo spostamento assiale relativo dei giunti.

La deformazione del terreno dovuta al passaggio dell'onda sismica è assorbita dal tunnel tramite una deformazione assiale nel concio stesso e uno spostamento assiale relativo (espansione/contrazione) nei giunti.

Tuttavia la rigidità assiale complessiva dei conci è generalmente maggiore di quella dei giunti, quindi, approssimando, si può assumere che la deformazione assiale dei conci è trascurabile (conci rigidi) e che tutti i giunti subiscano lo stesso spostamento.

Il massimo spostamento relativo Δu di un giunto è calcolato tramite la seguente formula:

$$\Delta u_{ass} = \varepsilon_g * L_o$$

dove:

ε_g = massima deformazione del terreno parallela all'asse del tunnel calcolata con la formula del metodo free field $\varepsilon_g = PGV/V_s * \sin\theta * \cos\theta$.

L_o = Lunghezza del singolo concio.

Per il tunnel in esame si è ottenuto:

$$\varepsilon_g = 1.27 * 10^{-4}$$

$$L_o = 2.32 \text{ m}$$

$$\Delta u_{ass} = 2.9 * 10^{-4} \text{ m}$$

Si conclude che il piccolo spostamento ottenuto non è assolutamente tale da pregiudicare l'integrità del giunto e quindi del tunnel in progetto.

Inoltre, è stata eseguita un'ulteriore verifica con riferimento allo studio sismico condotto per la parte offshore (Rif. /27/), che considera un sisma estremo con tempi di ritorno di 10000 anni.

I valori di accelerazione e di velocità in queste condizioni sono rispettivamente pari a 0,182 g e 0,223 m/s.

Anche in queste condizioni sismiche estreme, il valore dello spostamento assiale ottenuto, pari a $5.75 * 10^{-4} \text{ m}$, non è assolutamente tale da pregiudicare l'integrità del giunto e quindi del tunnel in progetto.

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	73 of 98

11.4 Deformazioni trasversali e interazione dello shaking con il gasdotto

11.4.1 Spostamento trasversale del giunto per effetto dello shaking

Per determinare lo spostamento trasversale del giunto nei tubi in c.a. per effetto dello scuotimento, si considera l'onda sismica che investe il tunnel.
L'ampiezza dello spostamento del terreno associata alla deformazione è $D = 3,1 * 10^{-3}$ m pari alla somma dell'ampiezza D_a e D_b riportate in Tabella 11.2.

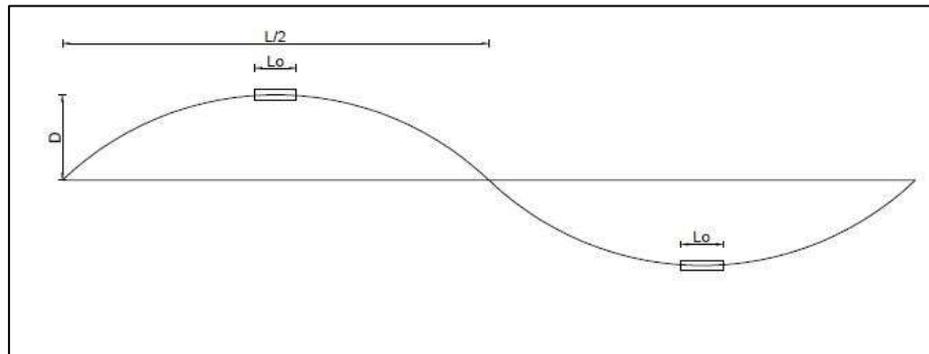


Figura 11.8: Spostamento relativo trasversale dei giunti

Con riferimento alla Figura 11.8, il numero di giunti presenti nel tratto pari a metà della lunghezza d'onda ($L/2$) è:

$$n^{\circ} \text{ giunti} = \frac{L}{2L_0} = 26$$

con:

$L_0 = 2.32$ m, lunghezza del tubo di protezione
 $L = 120$ m (cfr. Tabella 11.2)

Il massimo spostamento trasversale del singolo giunto si calcola tramite la seguente formula:

$$\Delta u_{\text{trav}} = \frac{2D}{n^{\circ} \text{ giunti}} = 2.4 * 10^{-4} \text{ m}$$

Con l'ipotesi di trascurare le forze attritive che si esercitano sul piano trasversale al giunto, anche in questo caso lo spostamento ottenuto di **0,24 mm** è così piccolo da non pregiudicare l'integrità della struttura in c.a..

La verifica eseguita considerando un sisma estremo con tempi di ritorno di 10000 anni (Rif. /27/), con le ipotesi precedentemente descritte, genera spostamenti di **0,45 mm** che, ugualmente, non costituiscono un pericolo per la struttura in c.a..

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	74 of 98

11.4.2 Interazione con il gasdotto

Per valutare l'interazione dello shaking con il gasdotto si considera lo spostamento trasversale nel giunto del tubo in c.a. determinato nel paragrafo precedente.

Con riferimento alla sezione trasversale corrente del microtunnel di Figura 5.3, le ipotesi di base sono:

- attrito nullo al contatto dei giunti dei tubi di protezione in c.a.;
- gasdotto non vincolato al tunnel (semplicemente appoggiato sul fondo);
- nella configurazione finale il microtunnel verrà riempito con acqua marina, pertanto, in certi limiti, il gasdotto non interagisce con le deformazioni trasversali del rivestimento in c.a. essendo libero di deformarsi.

La struttura in c.a. del tunnel può subire uno spostamento potenziale massimo k senza che ci siano interferenze con le deformazioni del gasdotto non vincolato:

$$k = D_i - OD = 1440\text{mm}$$

con:

diametro interno del MT

$D_i = 2400\text{ mm}$

diametro esterno del gasdotto

$OD = 960\text{ mm}$

Per effetto dello scuotimento sismico, la struttura in c.a. del microtunnel subisce uno spostamento trasversale massimo $\Delta u_{\text{trasy}} = 0,24\text{ mm}$, significativamente inferiore al valore k pertanto le deformazioni sul rivestimento in c.a. causate dallo shaking non hanno alcuna ripercussione sulla configurazione di deformazione del gasdotto.

I valori di spostamento trasversale calcolati con riferimento allo Studio Sismico della parte offshore, che considera un sisma con tempi di ritorno di 10000 anni, sono pari a $0,45\text{ mm}$ e, anche in questo caso, non costituiscono un elemento critico per l'opera da realizzare.

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	75 of 98

12 REVISION RECORD

Rev	Date	Description
A	12/09/2015	Issued for IDC
0A	18/09/2015	Emissione per Revisione
00	19/11/2015	Emissione per Approvazione
1	11/01/2017	Emissione per Costruzione

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	76 of 98

13 APPENDICE 1 - ELABORATI GRAFICI RIPORTATI FUORI SCALA NELLA RELAZIONE

- Figura 1: Sezione di verifica comparata alla sezione di progetto; in scala 1:8000
- Figura 2: Sezione analizzata con indicazione della zona in cui il coefficiente di sicurezza risulta minimo; in scala 1:8000
- Figura 3: Ingrandimento in scala 1:500 della Figura 2. Superficie con il minor coefficiente di sicurezza e relativo centro di rotazione
- Figura 4: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius - in scala 1:20000
- Figura 5: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius - ingrandimento in scala 1:10000 dell'area più significativa
- Figura 6: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius - ingrandimento in scala 1:2000 dell'area più significativa
- Figura 7: Superficie critica evidenziata in Figura 3 verificata in condizioni sismiche estreme (TR = 10000 anni)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	77 of 98

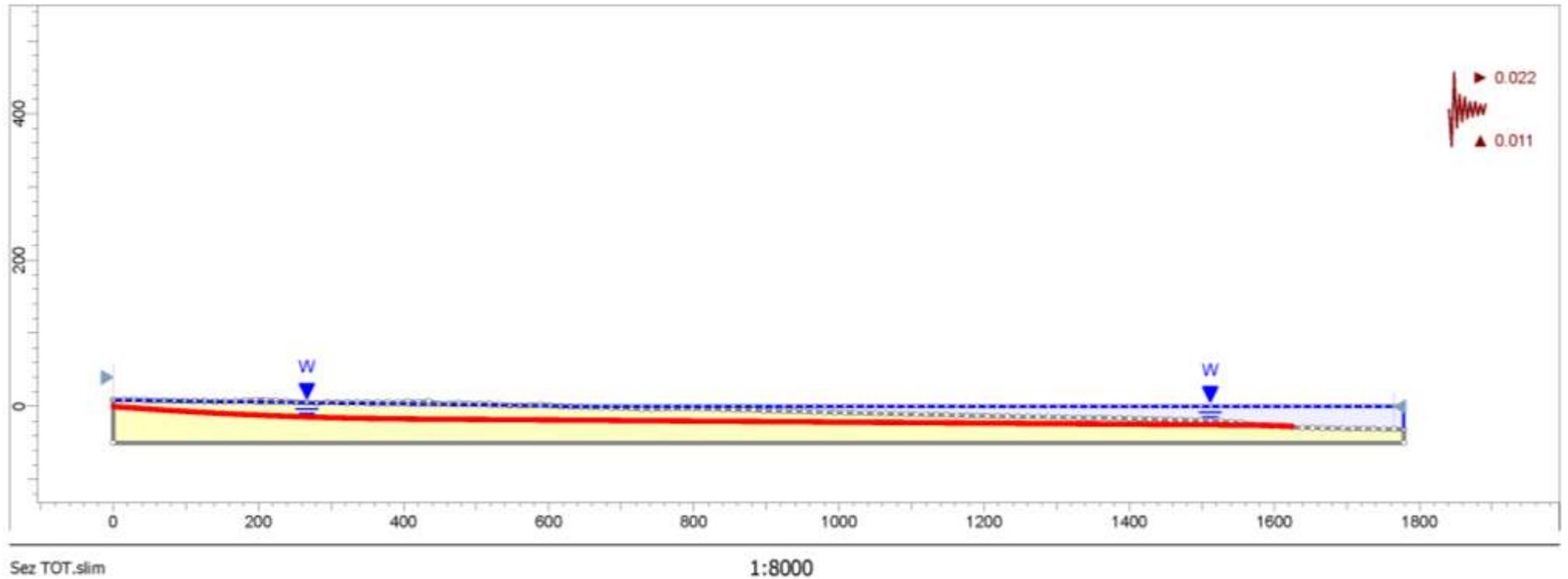


Figura 1: Sezione di verifica comparata alla sezione di progetto; in scala 1:8000

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	78 of 98

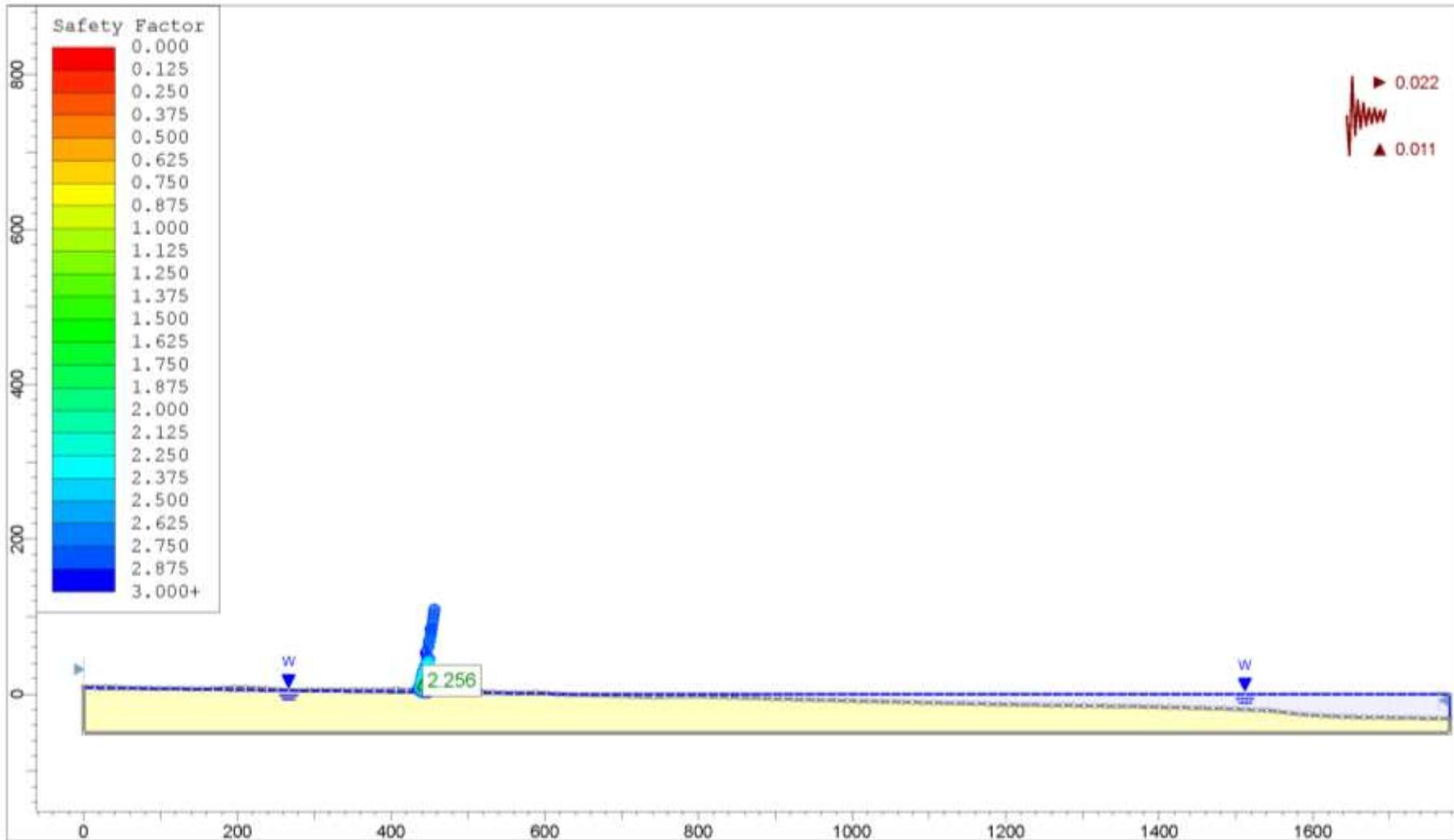


Figura 2: Sezione analizzata con indicazione della zona in cui il coefficiente di sicurezza risulta minimo; in scala 1:8000

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	79 of 98

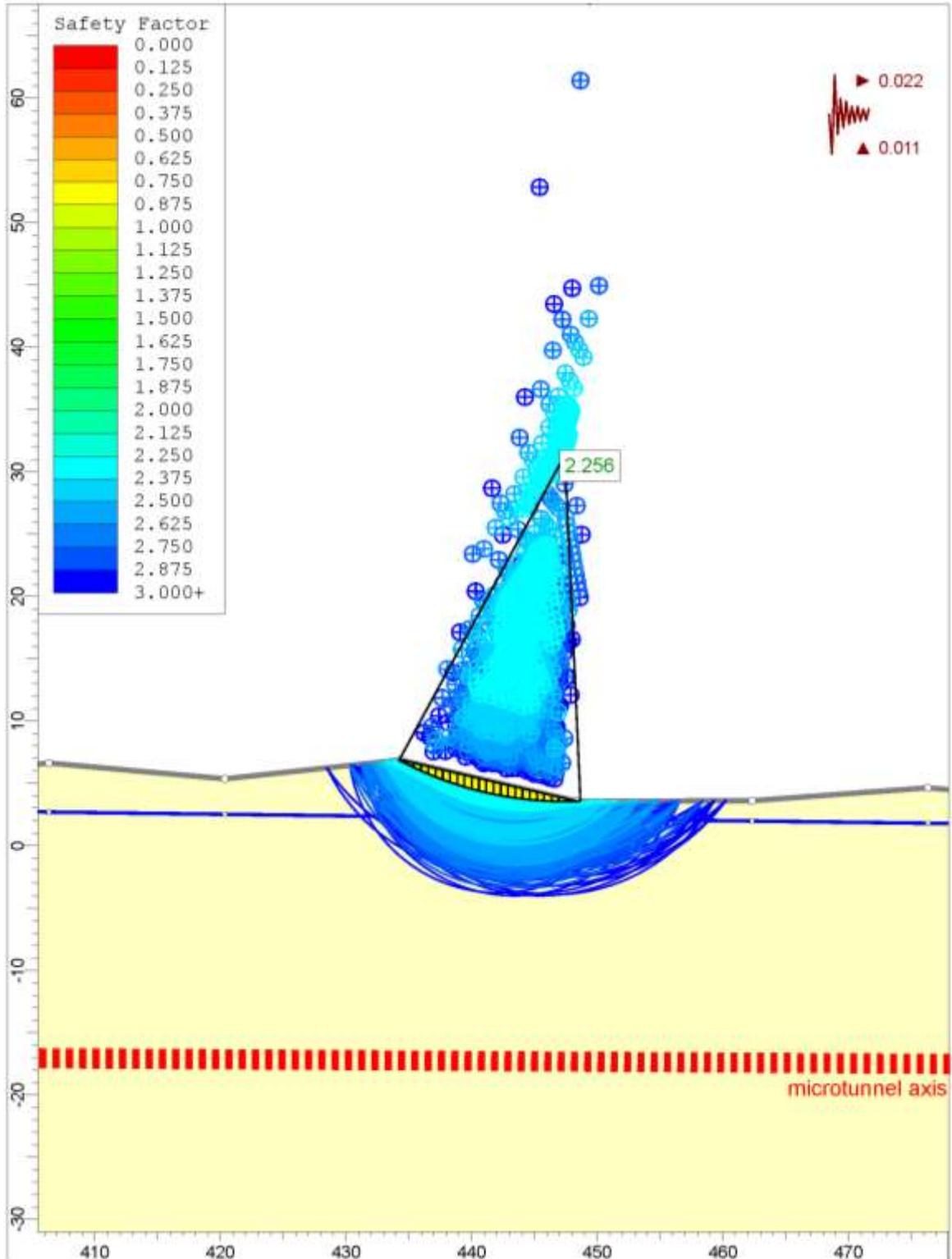


Figura 3: Ingrandimento in scala 1:500 della Figura 2. Superficie con il minor coefficiente di sicurezza e relativo centro di rotazione

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	80 of 98

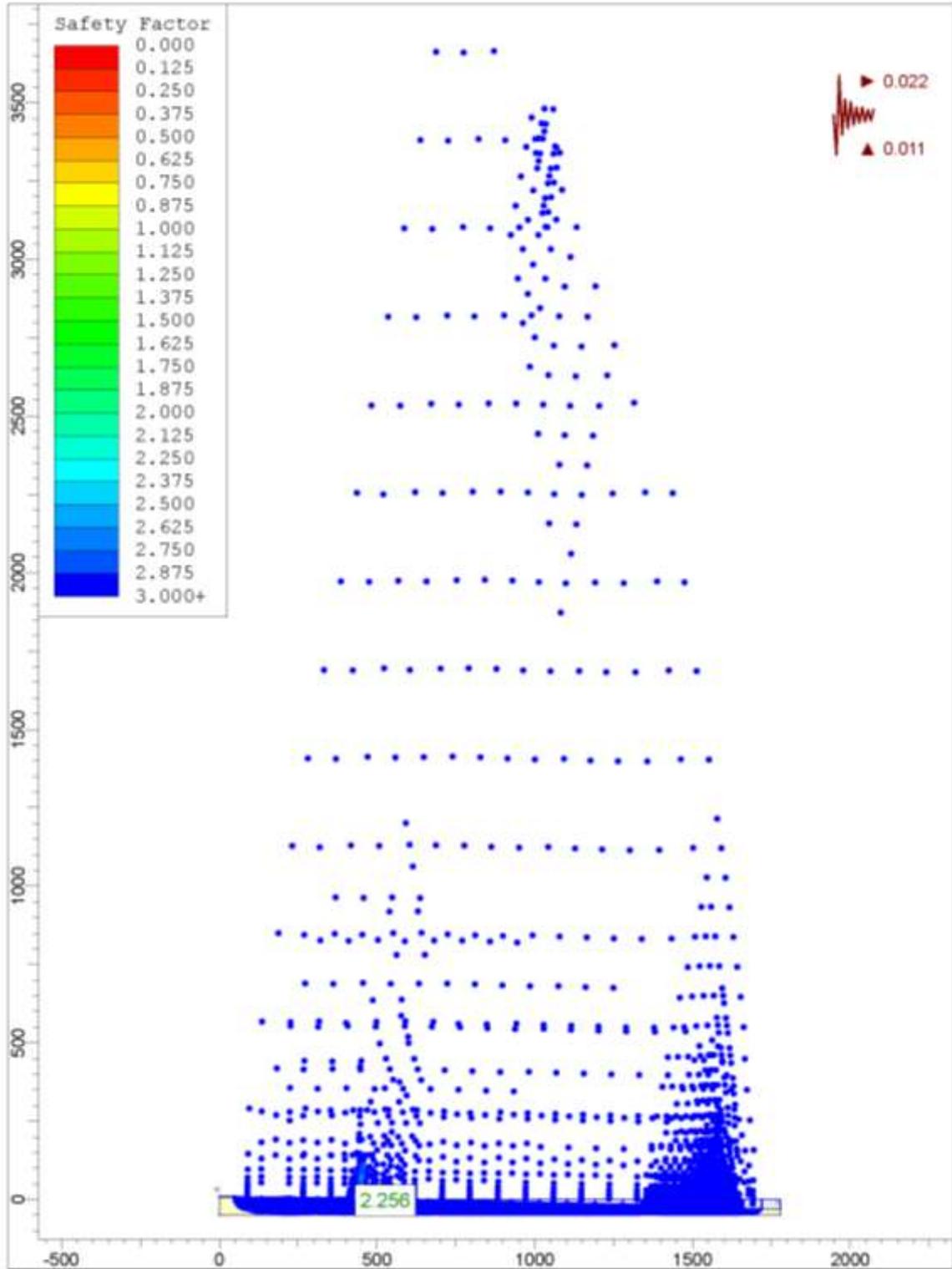


Figura 4: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius - in scala 1:20000

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	81 of 98

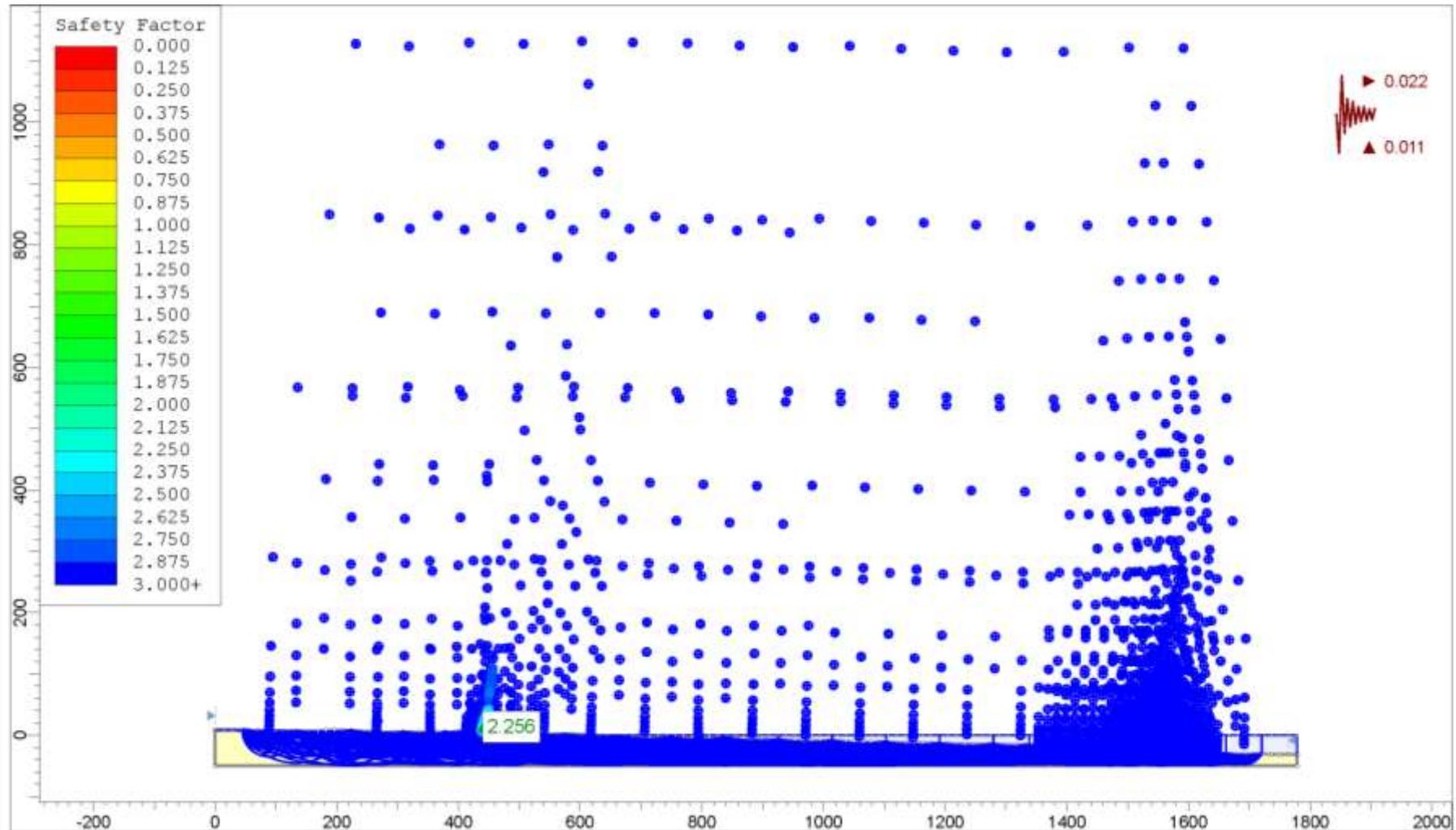


Figura 5: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius - ingrandimento in scala 1:10000 dell'area più significativa

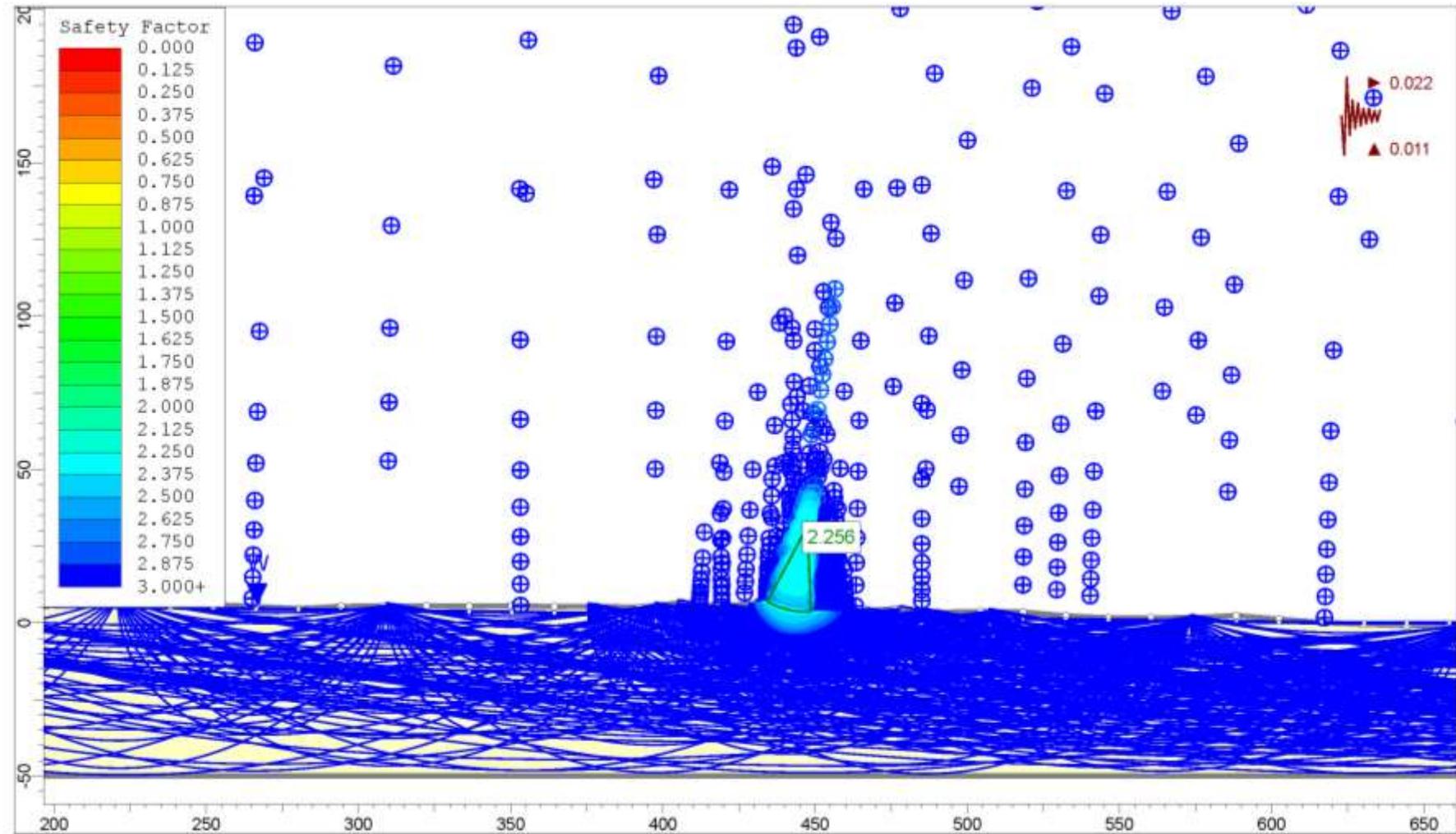


Figura 6: Mappa dei centri di rotazione delle superfici di potenziale scorrimento verificate con il metodo di Fellenius - ingrandimento in scala 1:2000 dell'area più significativa

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	83 of 98

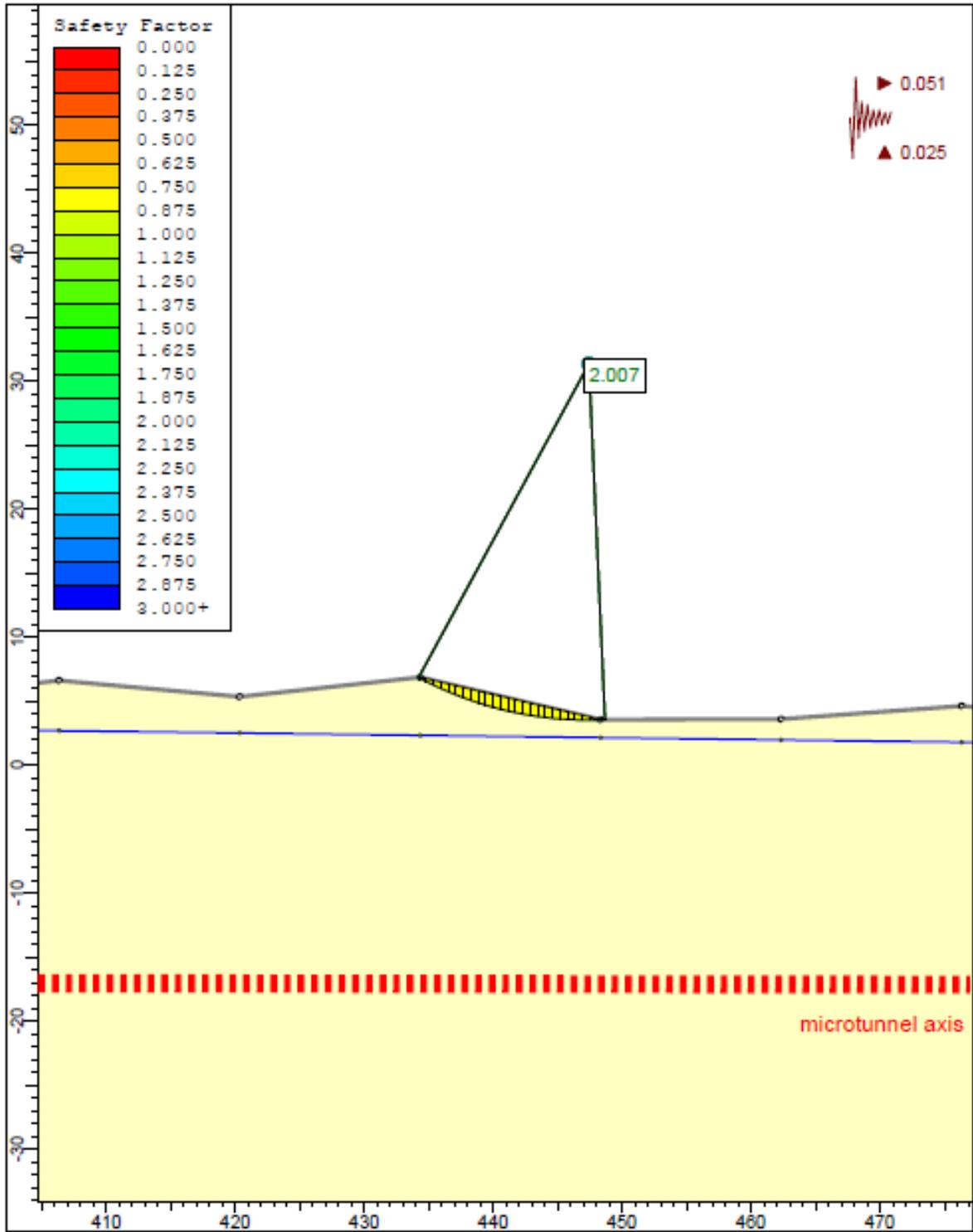


Figura 7: Superficie critica evidenziata in Figura 3 verificata in condizioni sismiche estreme (TR = 10000 anni)

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	84 of 98

Slide Analysis Information

TAP Microtunnel stability analysis

Project Summary

- File Name: Sez TOT.slim
- Slide Modeler Version: 6.034
- Project Title: TAP Microtunnel stability analysis
- Date Created: 01/09/2015, 17:03:19

General Settings

- | | |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Units of Measurement: Metric Units • Time Units: days • Permeability Units: meters/second • Failure Direction: Left to Right | <ul style="list-style-type: none"> • Data Output: Standard • Maximum Material Properties: 20 • Maximum Support Properties: 20 |
|---|--|

Analysis Options

Analysis Methods Used

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Bishop simplified • GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine | <ul style="list-style-type: none"> • Janbu corrected • Ordinary/Fellenius • Spencer |
| <ul style="list-style-type: none"> • Number of slices: 25 • Tolerance: 0.005 • Maximum number of iterations: 50 | <ul style="list-style-type: none"> • Check malpha < 0.2: Yes • Initial trial value of FS: 1 • Steffensen Iteration: Yes |

Groundwater Analysis

- Groundwater Method: Water Surfaces
- Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m³
- Advanced Groundwater Method: None

Random Numbers

- Pseudo-random Seed: 10116
- Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Surface Options

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Surface Type: Circular • Search Method: Auto Refine Search • Divisions along slope: 20 • Circles per division: 10 • Number of iterations: 10 | <ul style="list-style-type: none"> • Divisions to use in next iteration: 50% • Composite Surfaces: Disabled • Minimum Elevation: Not Defined • Minimum Depth: 1 |
|--|---|

Loading

- | | |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.022 | <ul style="list-style-type: none"> • Seismic Load Coefficient (Vertical): -0.011 |
|--|---|

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	85 of 98

Material Properties

Property	sand
Color	
Strength Type	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	18
Cohesion [kPa]	0
Friction Angle [deg]	30
Water Surface	Water Table
Hu Value	Automatically Calculated

Global Minimums

Method: ordinary/fellenius

- FS: 2.255990
- Center: 447.421, 31.369
- Radius: 27.826
- Left Slip Surface Endpoint: 434.231, 6.868
- Right Slip Surface Endpoint: 448.662, 3.571
- Resisting Moment=2652.26 kN-m
- Driving Moment=1175.65 kN-m
- Total Slice Area=9.63878 m2

Method: bishop simplified

- FS: 2.289890
- Center: 447.486, 31.600
- Radius: 28.060
- Left Slip Surface Endpoint: 434.231, 6.868
- Right Slip Surface Endpoint: 448.815, 3.571
- Resisting Moment=2704.51 kN-m
- Driving Moment=1181.06 kN-m
- Total Slice Area=9.60169 m2

Method: janbu corrected

- FS: 2.298550
- Center: 447.421, 31.369
- Radius: 27.826
- Left Slip Surface Endpoint: 434.231, 6.868
- Right Slip Surface Endpoint: 448.662, 3.571
- Resisting Horizontal Force=95.283 kN

- Driving Horizontal Force=41.4534 kN
- Total Slice Area=9.63878 m2

Method: spencer

- FS: 2.288320
- Center: 447.486, 31.600
- Radius: 28.060
- Left Slip Surface Endpoint: 434.231, 6.868
- Right Slip Surface Endpoint: 448.815, 3.571
- Resisting Moment=2702.65 kN-m
- Driving Moment=1181.06 kN-m
- Resisting Horizontal Force=93.3004 kN
- Driving Horizontal Force=40.7725 kN
- Total Slice Area=9.60169 m2

Method: gle/morgenstern-price

- FS: 2.288120
- Center: 447.486, 31.600
- Radius: 28.060
- Left Slip Surface Endpoint: 434.231, 6.868
- Right Slip Surface Endpoint: 448.815, 3.571
- Resisting Moment=2702.42 kN-m
- Driving Moment=1181.06 kN-m
- Resisting Horizontal Force=93.2993 kN
- Driving Horizontal Force=40.7754 kN
- Total Slice Area=9.60169 m2

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	86 of 98

Valid / Invalid Surfaces

Method: ordinary/fellenius

- Number of Valid Surfaces: 6666
- Number of Invalid Surfaces: 0

Method: bishop simplified

- Number of Valid Surfaces: 6639
- Number of Invalid Surfaces: 27

Error Codes:

- Error Code -112 reported for 27 surfaces

Method: janbu corrected

- Number of Valid Surfaces: 6594
- Number of Invalid Surfaces: 72

Error Codes:

- Error Code -108 reported for 23 surfaces
- Error Code -111 reported for 18 surfaces
- Error Code -112 reported for 31 surfaces

Method: spencer

- Number of Valid Surfaces: 6556
- Number of Invalid Surfaces: 110

Error Codes:

- Error Code -108 reported for 49 surfaces
- Error Code -111 reported for 24 surfaces
- Error Code -112 reported for 37 surfaces

Method: gle/morgenstern-price

- Number of Valid Surfaces: 6581
- Number of Invalid Surfaces: 85

Error Codes:

- Error Code -108 reported for 33 surfaces
- Error Code -111 reported for 15 surfaces
- Error Code -112 reported for 37 surfaces

Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

- -108 = Total driving moment or total driving force < 0.1. This is to limit the calculation of extremely high safety factors if the driving force is very small (0.1 is an arbitrary number).
- -111 = safety factor equation did not converge
- -112 = The coefficient $M\text{-Alpha} = \cos(\alpha)(1 + \tan(\alpha)\tan(\phi))/F < 0.2$ for the final iteration of the safety factor calculation. This screens out some slip surfaces which may not be valid in the context of the analysis, in particular, deep seated slip surfaces with many high negative base angle slices in the passive zone.

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	87 of 98

Slice Data

- Global Minimum Query (ordinary/fellenius) - Safety Factor: 2.25599

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.577252	1.21473	sand	0	30	0.413235	0.932253	1.61472	0	1.61472
2	0.577252	2.88477	sand	0	30	1.00553	2.26847	3.92912	0	3.92912
3	0.577252	4.34504	sand	0	30	1.54934	3.49529	6.05403	0	6.05403
4	0.577252	5.63817	sand	0	30	2.05351	4.6327	8.02407	0	8.02407
5	0.577252	6.76925	sand	0	30	2.51466	5.67305	9.82601	0	9.82601
6	0.577252	7.74287	sand	0	30	2.92973	6.60945	11.4479	0	11.4479
7	0.577252	8.5632	sand	0	30	3.29599	7.43572	12.879	0	12.879
8	0.577252	9.23399	sand	0	30	3.61097	8.14631	14.1098	0	14.1098
9	0.577252	9.75864	sand	0	30	3.87251	8.73635	15.1318	0	15.1318
10	0.577252	10.1402	sand	0	30	4.07873	9.20157	15.9376	0	15.9376
11	0.577252	10.3815	sand	0	30	4.228	9.53832	16.5208	0	16.5208
12	0.577252	10.4849	sand	0	30	4.31895	9.7435	16.8762	0	16.8762
13	0.577252	10.4528	sand	0	30	4.35046	9.8146	16.9994	0	16.9994
14	0.577252	10.287	sand	0	30	4.32167	9.74965	16.8869	0	16.8869
15	0.577252	9.98945	sand	0	30	4.23194	9.54721	16.5363	0	16.5363
16	0.577252	9.56158	sand	0	30	4.08086	9.20638	15.9459	0	15.9459
17	0.577252	9.00477	sand	0	30	3.86827	8.72677	15.1152	0	15.1152
18	0.577252	8.32019	sand	0	30	3.5942	8.10848	14.0443	0	14.0443
19	0.577252	7.5088	sand	0	30	3.25894	7.35213	12.7342	0	12.7342
20	0.577252	6.57142	sand	0	30	2.86296	6.45882	11.187	0	11.187
21	0.577252	5.50867	sand	0	30	2.40699	5.43015	9.4053	0	9.4053
22	0.577252	4.32101	sand	0	30	1.89194	4.2682	7.39272	0	7.39272
23	0.577252	3.00875	sand	0	30	1.31894	2.97552	5.15375	0	5.15375
24	0.577252	1.57202	sand	0	30	0.689351	1.55517	2.69364	0	2.69364
25	0.577252	0.234286	sand	0	30	0.102684	0.231653	0.401234	0	0.401234

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	88 of 98

• Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 2.28989

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.583383	1.23	sand	0	30	0.464717	1.06415	1.84316	0	1.84316
2	0.583383	2.92044	sand	0	30	1.11064	2.54324	4.40502	0	4.40502
3	0.583383	4.39753	sand	0	30	1.68305	3.85401	6.67533	0	6.67533
4	0.583383	5.70399	sand	0	30	2.19666	5.03011	8.71241	0	8.71241
5	0.583383	6.845	sand	0	30	2.6521	6.07301	10.5188	0	10.5188
6	0.583383	7.82523	sand	0	30	3.04993	6.984	12.0966	0	12.0966
7	0.583383	8.64891	sand	0	30	3.39062	7.76415	13.4479	0	13.4479
8	0.583383	9.31986	sand	0	30	3.67458	8.41439	14.5741	0	14.5741
9	0.583383	9.84154	sand	0	30	3.90213	8.93545	15.4766	0	15.4766
10	0.583383	10.217	sand	0	30	4.07351	9.3279	16.1564	0	16.1564
11	0.583383	10.4492	sand	0	30	4.18891	9.59214	16.614	0	16.614
12	0.583383	10.5405	sand	0	30	4.24841	9.7284	16.8501	0	16.8501
13	0.583383	10.4933	sand	0	30	4.25206	9.73674	16.8645	0	16.8645
14	0.583383	10.3095	sand	0	30	4.19979	9.61706	16.6572	0	16.6572
15	0.583383	9.99092	sand	0	30	4.09151	9.3691	16.2278	0	16.2278
16	0.583383	9.53915	sand	0	30	3.92701	8.99241	15.5753	0	15.5753
17	0.583383	8.95555	sand	0	30	3.70602	8.48638	14.6988	0	14.6988
18	0.583383	8.24128	sand	0	30	3.42821	7.85023	13.597	0	13.597
19	0.583383	7.39732	sand	0	30	3.09315	7.08297	12.2681	0	12.2681
20	0.583383	6.42447	sand	0	30	2.70033	6.18346	10.7101	0	10.7101
21	0.583383	5.32337	sand	0	30	2.24916	5.15033	8.92063	0	8.92063
22	0.583383	4.09445	sand	0	30	1.73896	3.98203	6.89708	0	6.89708
23	0.583383	2.73801	sand	0	30	1.16896	2.67678	4.63632	0	4.63632
24	0.583383	1.25417	sand	0	30	0.53827	1.23258	2.13489	0	2.13489
25	0.583383	0.129678	sand	0	30	0.0559507	0.128121	0.221911	0	0.221911

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	89 of 98

• Global Minimum Query (janbu corrected) - Safety Factor: 2.29855

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.577252	1.21473	sand	0	30	0.461008	1.05965	1.83537	0	1.83537
2	0.577252	2.88477	sand	0	30	1.1021	2.53323	4.38768	0	4.38768
3	0.577252	4.34504	sand	0	30	1.67072	3.84024	6.6515	0	6.6515
4	0.577252	5.63817	sand	0	30	2.18163	5.01458	8.68551	0	8.68551
5	0.577252	6.76925	sand	0	30	2.63543	6.05766	10.4922	0	10.4922
6	0.577252	7.74287	sand	0	30	3.03266	6.97072	12.0736	0	12.0736
7	0.577252	8.5632	sand	0	30	3.37378	7.75481	13.4317	0	13.4317
8	0.577252	9.23399	sand	0	30	3.65919	8.41082	14.568	0	14.568
9	0.577252	9.75864	sand	0	30	3.88917	8.93946	15.4836	0	15.4836
10	0.577252	10.1402	sand	0	30	4.06399	9.34128	16.1796	0	16.1796
11	0.577252	10.3815	sand	0	30	4.18379	9.61666	16.6566	0	16.6566
12	0.577252	10.4849	sand	0	30	4.24868	9.76581	16.9148	0	16.9148
13	0.577252	10.4528	sand	0	30	4.25868	9.78878	16.9547	0	16.9547
14	0.577252	10.287	sand	0	30	4.21373	9.68547	16.7757	0	16.7757
15	0.577252	9.98945	sand	0	30	4.11372	9.4556	16.3776	0	16.3776
16	0.577252	9.56158	sand	0	30	3.95847	9.09873	15.7595	0	15.7595
17	0.577252	9.00477	sand	0	30	3.74768	8.61424	14.9203	0	14.9203
18	0.577252	8.32019	sand	0	30	3.48105	8.00136	13.8588	0	13.8588
19	0.577252	7.5088	sand	0	30	3.15813	7.25912	12.5732	0	12.5732
20	0.577252	6.57142	sand	0	30	2.77843	6.38637	11.0615	0	11.0615
21	0.577252	5.50867	sand	0	30	2.34138	5.38177	9.3215	0	9.3215
22	0.577252	4.32101	sand	0	30	1.84629	4.24378	7.35044	0	7.35044
23	0.577252	3.00875	sand	0	30	1.2924	2.97064	5.1453	0	5.1453
24	0.577252	1.57202	sand	0	30	0.67885	1.56037	2.70265	0	2.70265
25	0.577252	0.234286	sand	0	30	0.101715	0.233797	0.40495	0	0.40495

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	90 of 98

• Global Minimum Query (spencer) - Safety Factor: 2.28832

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.583383	1.23	sand	0	30	0.43726	1.00059	1.73307	0	1.73307
2	0.583383	2.92044	sand	0	30	1.05089	2.40478	4.16519	0	4.16519
3	0.583383	4.39753	sand	0	30	1.60135	3.66439	6.3469	0	6.3469
4	0.583383	5.70399	sand	0	30	2.10147	4.80883	8.32914	0	8.32914
5	0.583383	6.845	sand	0	30	2.55092	5.83733	10.1106	0	10.1106
6	0.583383	7.82523	sand	0	30	2.94934	6.74904	11.6897	0	11.6897
7	0.583383	8.64891	sand	0	30	3.29629	7.54296	13.0648	0	13.0648
8	0.583383	9.31986	sand	0	30	3.59128	8.218	14.234	0	14.234
9	0.583383	9.84154	sand	0	30	3.83379	8.77294	15.1952	0	15.1952
10	0.583383	10.217	sand	0	30	4.02322	9.20641	15.946	0	15.946
11	0.583383	10.4492	sand	0	30	4.15889	9.51688	16.4837	0	16.4837
12	0.583383	10.5405	sand	0	30	4.24009	9.70268	16.8055	0	16.8055
13	0.583383	10.4933	sand	0	30	4.26599	9.76195	16.9083	0	16.9083
14	0.583383	10.3095	sand	0	30	4.2357	9.69264	16.7881	0	16.7881
15	0.583383	9.99092	sand	0	30	4.14824	9.49251	16.4415	0	16.4415
16	0.583383	9.53915	sand	0	30	4.00254	9.1591	15.864	0	15.864
17	0.583383	8.95555	sand	0	30	3.79741	8.6897	15.051	0	15.051
18	0.583383	8.24128	sand	0	30	3.53158	8.08139	13.9974	0	13.9974
19	0.583383	7.39732	sand	0	30	3.20363	7.33094	12.6975	0	12.6975
20	0.583383	6.42447	sand	0	30	2.81203	6.43483	11.1455	0	11.1455
21	0.583383	5.32337	sand	0	30	2.3551	5.38923	9.33443	0	9.33443
22	0.583383	4.09445	sand	0	30	1.83102	4.18997	7.25724	0	7.25724
23	0.583383	2.73801	sand	0	30	1.23779	2.83247	4.90597	0	4.90597
24	0.583383	1.25417	sand	0	30	0.573233	1.31174	2.272	0	2.272
25	0.583383	0.129678	sand	0	30	0.0605278	0.138507	0.239901	0	0.239901

	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	91 of 98

• Global Minimum Query (gle/morgenstern-price) - Safety Factor: 2.28812

Slice Number	Width [m]	Weight [kN]	Base Material	Base Cohesion [kPa]	Base Friction Angle [degrees]	Shear Stress [kPa]	Shear Strength [kPa]	Base Normal Stress [kPa]	Pore Pressure [kPa]	Effective Normal Stress [kPa]
1	0.583383	1.23	sand	0	30	0.460675	1.05408	1.82571	0	1.82571
2	0.583383	2.92044	sand	0	30	1.08861	2.49086	4.3143	0	4.3143
3	0.583383	4.39753	sand	0	30	1.63418	3.7392	6.47649	0	6.47649
4	0.583383	5.70399	sand	0	30	2.11847	4.84732	8.39581	0	8.39581
5	0.583383	6.845	sand	0	30	2.54736	5.82866	10.0955	0	10.0955
6	0.583383	7.82523	sand	0	30	2.92543	6.69373	11.5939	0	11.5939
7	0.583383	8.64891	sand	0	30	3.25597	7.45005	12.9039	0	12.9039
8	0.583383	9.31986	sand	0	30	3.54098	8.10218	14.0334	0	14.0334
9	0.583383	9.84154	sand	0	30	3.78117	8.65178	14.9853	0	14.9853
10	0.583383	10.217	sand	0	30	3.97606	9.09771	15.7577	0	15.7577
11	0.583383	10.4492	sand	0	30	4.12407	9.43636	16.3443	0	16.3443
12	0.583383	10.5405	sand	0	30	4.22264	9.6619	16.735	0	16.735
13	0.583383	10.4933	sand	0	30	4.26849	9.76681	16.9166	0	16.9166
14	0.583383	10.3095	sand	0	30	4.25787	9.74251	16.8745	0	16.8745
15	0.583383	9.99092	sand	0	30	4.18689	9.5801	16.5932	0	16.5932
16	0.583383	9.53915	sand	0	30	4.05187	9.27116	16.0581	0	16.0581
17	0.583383	8.95555	sand	0	30	3.84975	8.80869	15.2571	0	15.2571
18	0.583383	8.24128	sand	0	30	3.57841	8.18783	14.1817	0	14.1817
19	0.583383	7.39732	sand	0	30	3.23698	7.40661	12.8286	0	12.8286
20	0.583383	6.42447	sand	0	30	2.82605	6.46635	11.2	0	11.2
21	0.583383	5.32337	sand	0	30	2.3477	5.37182	9.30427	0	9.30427
22	0.583383	4.09445	sand	0	30	1.80546	4.13112	7.1553	0	7.1553
23	0.583383	2.73801	sand	0	30	1.20408	2.75507	4.77192	0	4.77192
24	0.583383	1.25417	sand	0	30	0.549097	1.2564	2.17616	0	2.17616
25	0.583383	0.129678	sand	0	30	0.0566325	0.129582	0.224443	0	0.224443

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	92 of 98

Interslice Data

- **Global Minimum Query (ordinary/fellenius) - Safety Factor: 2.25599**

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	434.231	6.86815	0	0	0
2	434.808	6.56605	0	0	0
3	435.385	6.28086	0	0	0
4	435.963	6.01201	0	0	0
5	436.54	5.759	0	0	0
6	437.117	5.52134	0	0	0
7	437.694	5.29863	0	0	0
8	438.272	5.09049	0	0	0
9	438.849	4.89656	0	0	0
10	439.426	4.71654	0	0	0
11	440.003	4.55015	0	0	0
12	440.581	4.39714	0	0	0
13	441.158	4.25728	0	0	0
14	441.735	4.13037	0	0	0
15	442.312	4.01623	0	0	0
16	442.89	3.9147	0	0	0
17	443.467	3.82563	0	0	0
18	444.044	3.74891	0	0	0
19	444.621	3.68444	0	0	0
20	445.199	3.63213	0	0	0
21	445.776	3.59192	0	0	0
22	446.353	3.56374	0	0	0
23	446.93	3.54756	0	0	0
24	447.508	3.54337	0	0	0
25	448.085	3.55115	0	0	0
26	448.662	3.57092	0	0	0

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	93 of 98

• **Global Minimum Query (bishop simplified) - Safety Factor: 2.28989**

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	434.231	6.86815	0	0	0
2	434.814	6.56422	0.316207	0	0
3	435.398	6.27738	0.996253	0	0
4	435.981	6.00704	1.91598	0	0
5	436.564	5.75269	2.97627	0	0
6	437.148	5.51387	4.09221	0	0
7	437.731	5.29014	5.19188	0	0
8	438.315	5.08113	6.21535	0	0
9	438.898	4.88649	7.11391	0	0
10	439.481	4.70592	7.8493	0	0
11	440.065	4.53912	8.39313	0	0
12	440.648	4.38584	8.7264	0	0
13	441.231	4.24587	8.83908	0	0
14	441.815	4.11898	8.72979	0	0
15	442.398	4.00501	8.40553	0	0
16	442.982	3.9038	7.8815	0	0
17	443.565	3.8152	7.18095	0	0
18	444.148	3.7391	6.33514	0	0
19	444.732	3.67538	5.38329	0	0
20	445.315	3.62398	4.37263	0	0
21	445.899	3.58482	3.35849	0	0
22	446.482	3.55784	2.40445	0	0
23	447.065	3.54302	1.58253	0	0
24	447.649	3.54033	0.973455	0	0
25	448.232	3.54977	0.66695	0	0
26	448.815	3.57136	0	0	0

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	94 of 98

• **Global Minimum Query (janbu corrected) - Safety Factor: 2.29855**

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	434.231	6.86815	0	0	0
2	434.808	6.56605	0.310046	0	0
3	435.385	6.28086	0.976617	0	0
4	435.963	6.01201	1.87778	0	0
5	436.54	5.759	2.91625	0	0
6	437.117	5.52134	4.00862	0	0
7	437.694	5.29863	5.0842	0	0
8	438.272	5.09049	6.08403	0	0
9	438.849	4.89656	6.9601	0	0
10	439.426	4.71654	7.67464	0	0
11	440.003	4.55015	8.19953	0	0
12	440.581	4.39714	8.5158	0	0
13	441.158	4.25728	8.61326	0	0
14	441.735	4.13037	8.49017	0	0
15	442.312	4.01623	8.15297	0	0
16	442.89	3.9147	7.6161	0	0
17	443.467	3.82563	6.90186	0	0
18	444.044	3.74891	6.04035	0	0
19	444.621	3.68444	5.06946	0	0
20	445.199	3.63213	4.03487	0	0
21	445.776	3.59192	2.99015	0	0
22	446.353	3.56374	1.9969	0	0
23	446.93	3.54756	1.12494	0	0
24	447.508	3.54337	0.452578	0	0
25	448.085	3.55115	0.0668543	0	0
26	448.662	3.57092	0	0	0

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	95 of 98

• **Global Minimum Query (spencer) - Safety Factor: 2.28832**

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	434.231	6.86815	0	0	0
2	434.814	6.56422	0.298681	0.0727093	13.6817
3	435.398	6.27738	0.944586	0.229945	13.6817
4	435.981	6.00704	1.82288	0.443753	13.6817
5	436.564	5.75269	2.84083	0.691556	13.6817
6	437.148	5.51387	3.91782	0.953732	13.6816
7	437.731	5.29014	4.98455	1.21341	13.6816
8	438.315	5.08113	5.98237	1.45632	13.6817
9	438.898	4.88649	6.86264	1.6706	13.6816
10	439.481	4.70592	7.58635	1.84678	13.6817
11	440.065	4.53912	8.12368	1.97758	13.6816
12	440.648	4.38584	8.45371	2.05792	13.6816
13	441.231	4.24587	8.56423	2.08483	13.6817
14	441.815	4.11898	8.45156	2.0574	13.6816
15	442.398	4.00501	8.1205	1.97681	13.6817
16	442.982	3.9038	7.58424	1.84627	13.6817
17	443.565	3.8152	6.86448	1.67105	13.6816
18	444.148	3.7391	5.99147	1.45853	13.6816
19	444.732	3.67538	5.00418	1.21819	13.6817
20	445.315	3.62398	3.95057	0.961706	13.6817
21	445.899	3.58482	2.88782	0.702995	13.6817
22	446.482	3.55784	1.88272	0.45832	13.6817
23	447.065	3.54302	1.01211	0.246383	13.6817
24	447.649	3.54033	0.363381	0.0884595	13.6817
25	448.232	3.54977	0.0350842	0.00854071	13.6817
26	448.815	3.57136	0	0	0

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
 SAIPEM	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	96 of 98

• **Global Minimum Query (gle/morgenstern-price) - Safety Factor: 2.28812**

Slice Number	X coordinate [m]	Y coordinate - Bottom [m]	Interslice Normal Force [kN]	Interslice Shear Force [kN]	Interslice Force Angle [degrees]
1	434.231	6.86815	0	0	0
2	434.814	6.56422	0.313168	0.0113535	2.07627
3	435.398	6.27738	0.979815	0.0704836	4.11452
4	435.981	6.00704	1.87395	0.199544	6.07813
5	436.564	5.75269	2.89888	0.403963	7.93316
6	437.148	5.51387	3.97431	0.675719	9.64925
7	437.731	5.29014	5.0335	0.996688	11.2003
8	438.315	5.08113	6.02113	1.34197	12.5645
9	438.898	4.88649	6.89164	1.68313	13.7246
10	439.481	4.70592	7.60806	1.99125	14.667
11	440.065	4.53912	8.14141	2.23971	15.3816
12	440.648	4.38584	8.47029	2.4067	15.8617
13	441.231	4.24587	8.58101	2.47723	16.1028
14	441.815	4.11898	8.46787	2.44457	16.1028
15	442.398	4.00501	8.13362	2.31104	15.8617
16	442.982	3.9038	7.59009	2.08804	15.3816
17	443.565	3.8152	6.85866	1.79511	14.667
18	444.148	3.7391	5.97071	1.45822	13.7246
19	444.732	3.67538	4.96777	1.1072	12.5645
20	445.315	3.62398	3.90137	0.772513	11.2003
21	445.899	3.58482	2.83251	0.481589	9.64927
22	446.482	3.55784	1.83087	0.255134	7.93315
23	447.065	3.54302	0.973622	0.103674	6.07811
24	447.649	3.54033	0.344177	0.0247585	4.11451
25	448.232	3.54977	0.0308521	0.0011185	2.07627
26	448.815	3.57136	0	0	0

 Trans Adriatic Pipeline	TAP AG Doc. no.:	OPL00-SPF-200-G-TRX-0017	Rev. No.:	1
	Doc. Title:	Prescrizione A18 - Approdo Italiano Analisi Sismica del Microtunnel	Page:	97 of 98

List Of Coordinates

Water Table

X	Y					
	0	8.1	574.34	0.54	1176.34	0
	0.34	7.92	588.34	0.36	1190.34	0
	14.34	7.74	602.34	0.18	1204.34	0
	28.34	7.56	616.34	0	1218.34	0
	42.34	7.38	630.34	0	1232.34	0
	56.34	7.2	644.34	0	1246.34	0
	70.34	7.02	658.34	0	1260.34	0
	84.34	6.84	672.34	0	1274.34	0
	98.34	6.66	686.34	0	1288.34	0
	112.34	6.48	700.34	0	1302.34	0
	126.34	6.3	714.34	0	1316.34	0
	140.34	6.12	728.34	0	1330.34	0
	154.34	5.94	742.34	0	1344.34	0
	168.34	5.76	756.34	0	1358.34	0
	182.34	5.58	770.34	0	1372.34	0
	196.34	5.4	784.34	0	1386.34	0
	210.34	5.22	798.34	0	1400.34	0
	224.34	5.04	812.34	0	1414.34	0
	238.34	4.86	826.34	0	1428.34	0
	252.34	4.68	840.34	0	1442.34	0
	266.34	4.5	854.34	0	1456.34	0
	280.34	4.32	868.34	0	1470.34	0
	294.34	4.14	882.34	0	1484.34	0
	308.34	3.96	896.34	0	1498.34	0
	322.34	3.78	910.34	0	1512.34	0
	336.34	3.6	924.34	0	1526.34	0
	350.34	3.42	938.34	0	1540.34	0
	364.34	3.24	952.34	0	1554.34	0
	378.34	3.06	966.34	0	1568.34	0
	392.34	2.88	980.34	0	1582.34	0
	406.34	2.7	994.34	0	1596.34	0
	420.34	2.52	1008.34	0	1610.34	0
	434.34	2.34	1022.34	0	1624.34	0
	448.34	2.16	1036.34	0	1638.34	0
	462.34	1.98	1050.34	0	1652.34	0
	476.34	1.8	1064.34	0	1666.34	0
	490.34	1.62	1078.34	0	1680.34	0
	504.34	1.44	1092.34	0	1694.34	0
	518.34	1.26	1106.34	0	1708.34	0
	532.34	1.08	1120.34	0	1722.34	0
	546.34	0.9	1134.34	0	1736.34	0
	560.34	0.72	1148.34	0	1750.34	0
			1162.34	0	1764.34	0
					1778.34	0
					1778.34	-31.3

External Boundary

X	Y				
1778.34	-50	1162.34	-12.2	518.34	3.48
1778.34	-31.3	1148.34	-11.92	504.34	3.69
1764.34	-31.13	1134.34	-11.67	490.34	3.4
1750.34	-31.03	1120.34	-11.41	476.34	4.64
1736.34	-30.87	1106.34	-11.17	462.34	3.61
1722.34	-30.71	1092.34	-10.72	448.34	3.57
1708.34	-30.46	1078.34	-10.43	434.34	6.88
1694.34	-30.32	1064.34	-10.1	420.34	5.36
1680.34	-30.05	1050.34	-9.85	406.34	6.63
1666.34	-29.73	1036.34	-9.4	392.34	5.04
1652.34	-29.53	1022.34	-9.15	378.34	5.36
1638.34	-29.14	1008.34	-8.72	364.34	5.24
1624.34	-28.56	994.34	-8.45	350.34	5.55
1610.34	-27.73	980.34	-7.96	336.34	5.38
1596.34	-26.9	966.34	-7.64	322.34	5.53
1582.34	-25.9	952.34	-7.36	308.34	5.43
1568.34	-24.14	938.34	-7.02	294.34	5.36
1554.34	-22.52	924.34	-6.73	280.34	4.58
1540.34	-21.03	910.34	-6.05	266.34	5.3
1526.34	-20.54	896.34	-6.04	252.34	5.9
1512.34	-19.82	882.34	-5.22	238.34	6.8
1498.34	-19.32	868.34	-4.97	224.34	7.77
1484.34	-18.8	854.34	-4.54	210.34	8.46
1470.34	-18.33	840.34	-4.09	196.34	8.6
1456.34	-17.9	826.34	-3.62	182.34	8.05
1442.34	-17.53	812.34	-3.23	168.34	7.06
1428.34	-17.25	798.34	-2.96	154.34	6.9
1414.34	-16.9	784.34	-2.83	140.34	6.77
1400.34	-16.63	770.34	-2.91	126.34	7.08
1386.34	-16.17	756.34	-3.33	112.34	7.27
1372.34	-16	742.34	-3.83	98.34	7.55
1358.34	-15.81	728.34	-3.56	84.34	7.66
1344.34	-15.74	714.34	-2.79	70.34	8.17
1330.34	-15.41	700.34	-2.21	56.34	8.07
1316.34	-15.2	686.34	-1.88	42.34	9.03
1302.34	-14.96	672.34	-1.54	28.34	9.32
1288.34	-14.7	658.34	-1.21	14.34	9.37
1274.34	-14.48	644.34	-0.88	0.34	8.99
1260.34	-14.29	630.34	-0.54	0	8.97
1246.34	-14.07	616.34	0.04	0	-50
1232.34	-13.86	602.34	1.17		
1218.34	-13.53	588.34	2.34		
1204.34	-13.24	574.34	1.65		
1190.34	-12.92	560.34	1.6		
1176.34	-12.69	546.34	1.57		
		532.34	2.27		