

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Metanodotto

**RIFACIMENTO METANODOTTO RAVENNA MARE - RAVENNA TERRA
DN 300 (12") – DP 75 bar**

ATTRAVERSAMENTO IN TOC FIUMI UNITI e VIA MARABINA

**RELAZIONE GEOTECNICA TOC
E VERIFICA IDRAULICA
SIFONAMENTO ARGINI**



1	Emissione per Appalto	Polloni	Battisti	Luminari	15.06.2018
0	Emissione per permessi	Polloni	Battisti	Luminari	08.06.2018
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

RIFACIMENTO METANODOTTO RAVENNA MARE – RAVENNA TERRA DN 300 (12") – DP 75 bar ATTRAVERSAMENTO TOC F. U NITI e VIA MARABINA	Pag. 1 di 49
--	--------------

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

INDICE

1	PREMESSA	4
1.1	Generalità	4
1.2	Scopo della relazione	4
2	LOCALIZZAZIONE DELL'ATTRAVERSAMENTO	6
3	CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA E GEOLOGICA	9
3.1	Inquadramento fisico dell'area	9
3.2	Caratteristiche stratigrafiche	10
3.3	Caratterizzazione geotecnica	11
4	CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE	13
5	SCELTA DEL PROFILO DI TRIVELLAZIONE	14
5.1	Localizzazione dei punti di entrata e di uscita	14
5.2	Profondità del profilo	15
5.3	Raggi di curvatura	16
5.4	Angoli di ingresso e di uscita	19
5.5	Individuazione del corridoio litologicamente idoneo	20
6	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO	22
7	PLASTICIZZAZIONE DEL TERRENO	24
7.1	Generalità	24
7.2	Metodologia	24
7.3	Calcolo della perdita di carico	27
7.4	Calcoli e risultati	29
8	VERIFICA AL SIFONAMENTO	36

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

8.1	Generalità	36
8.2	Metodologia	36
8.2.1	Metodo del gradiente	37
8.2.2	Criterio di Lane	38
8.2.3	Metodo olandese	39
8.3	Risultati	40
9	CEDIMENTI DEL TERRENO IN FASE DI PERFORAZIONE.....	42
9.1	Generalità	42
9.2	Metodologia	42
9.3	Risultati	43
10	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	44

ALLEGATO 1 - Indagini geognostiche

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

1 PREMESSA

1.1 Generalità

Tutta l'area ravennate interessata dal tracciato è, secondo il PAI, a potenziale rischio di allagamento. La Normativa del Piano Stralcio per il Rischio Idrogeologico (PAI), nel Testo coordinato con le varianti introdotte (approvato con Delibera Giunta Regionale n. 2112 del 5 dicembre 2016) all'Art. 3, stabilisce che anche nelle aree ad elevata probabilità di esondazione è consentita *“la realizzazione di nuove infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico essenziali e non delocalizzabili”, “a condizione che non aumentino il livello di rischio comportando significativo ostacolo al deflusso o riduzione apprezzabile della capacità d'invaso ...”*.

Il tracciato del metanodotto in oggetto attraversa, nel suo sviluppo intorno alla città di Ravenna, numerosi corsi d'acqua sia di primaria importanza che secondari. Il criterio progettuale che si è adottato è stato quello di posizionare sempre gli attraversamenti in subalveo e di scegliere, almeno per i corsi principali, tecnologie di installazione della tubazione che permettessero da una parte di non incidere minimamente sull'ambiente e sulla dinamica fluviale, dall'altra di posizionare la condotta in profondità, in posizione sicura e protetta nei confronti di qualsiasi fenomeno idraulico.

Tali tecnologie sono rappresentate dai cosiddetti metodi trenchless che permettono l'installazione della condotta tramite *perforazione orizzontale controllata (T.O.C.)* oppure tramite *trivellazione con spingitubo*.

Le installazioni in tal modo eseguite consentono di rispettare le prescrizioni PAI di non ostacolare il deflusso idrico e di non ridurre affatto la capacità d'invaso.

1.2 Scopo della relazione

La presente relazione illustra i criteri e le verifiche tecniche alla base della progettazione della trivellazione orizzontale controllata (TOC) per l'attraversamento dei Fiumi Uniti e della Via Marabina lungo il metanodotto Snam *“Rifacimento Metanodotto Ravenna Mare - Ravenna Terra DN 300 (12”) – DP 75 bar”* che si sviluppa interamente nell'ambito del territorio del comune di Ravenna.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

Il progetto prevede tramite tale tecnica trenchless l'installazione in subalveo della tubazione del metanodotto DN 300 mm (12") e anche di una tubazione DN 200 mm (8") portacavi ad essa parallela, come riportato nell'elaborato grafico AT-20088-04.

Di seguito vengono esposti i criteri di scelta del profilo di trivellazione in funzione delle particolarità del sito, morfologiche e litologiche, e di dimensionamento della sua geometria in funzione delle caratteristiche della tubazione e dei terreni attraversati.

Sono riportate le verifiche per il dimensionamento della TOC finalizzata all'installazione della condotta del metanodotto, ivi comprese quelle geotecniche relative alla compatibilità della pressione dei fanghi con la resistenza del terreno, nonché quelle idrauliche relative alla stabilità degli argini del corso d'acqua attraversato. La geometria del profilo di trivellazione per la tubazione portacavo seguirà in parallelo quella della condotta del metanodotto.

Vengono inoltre fornite indicazioni di carattere operativo per l'esecuzione della trivellazione; resta comunque a carico dell'impresa appaltatrice stabilire, documentandone l'adeguatezza alla situazione locale, le esatte modalità, equipaggiamenti, diametri di perforazione da impiegare per condurre la TOC con successo e senza danno alla condotta da installare.

Per il presente studio ci si è basati sui risultati di una specifica indagine geognostica, di prove di laboratorio geotecnico e caratterizzazione geotecnica riportate nella relazione geologica COMIS NR/08283/NR/17135-200 nella relazione geotecnica COMIS NR/08283/NR/17135-202.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

2 LOCALIZZAZIONE DELL'ATTRAVERSAMENTO

L'attraversamento in progetto, finalizzato all'attraversamento in subalveo dei Fiumi Uniti e della Via Marabina che scorre a lato ai piedi dell'argine destro, si ubica lungo il tracciato del metanodotto "Rifacimento Metanodotto Ravenna Mare - Ravenna Terra, DN 300 (12") DP 75 bar", alla progressiva km 2+068 e ricade nel territorio del comune di Ravenna, ad Est del centro cittadino.

Il sito si localizza nel foglio IGM 89 Ravenna a scala 1:100.000 e nella sezione n. 240044, della cartografia tecnica regionale della Regione Emilia Romagna a scala 1:10.000.

Di seguito viene mostrata la localizzazione dell'area in studio lungo il tracciato generale del metanodotto su base Atlante stradale De Agostini (Fig.1), su cartografia CTR 1:10.000 (Fig.2a) e su immagine aerea Google (Fig. 2b).



Figura 1– Stralcio Atlante 1:200.000 con localizzazione dell'attraversamento in oggetto (cerchio giallo) lungo il tracciato del metanodotto (in rosso)

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

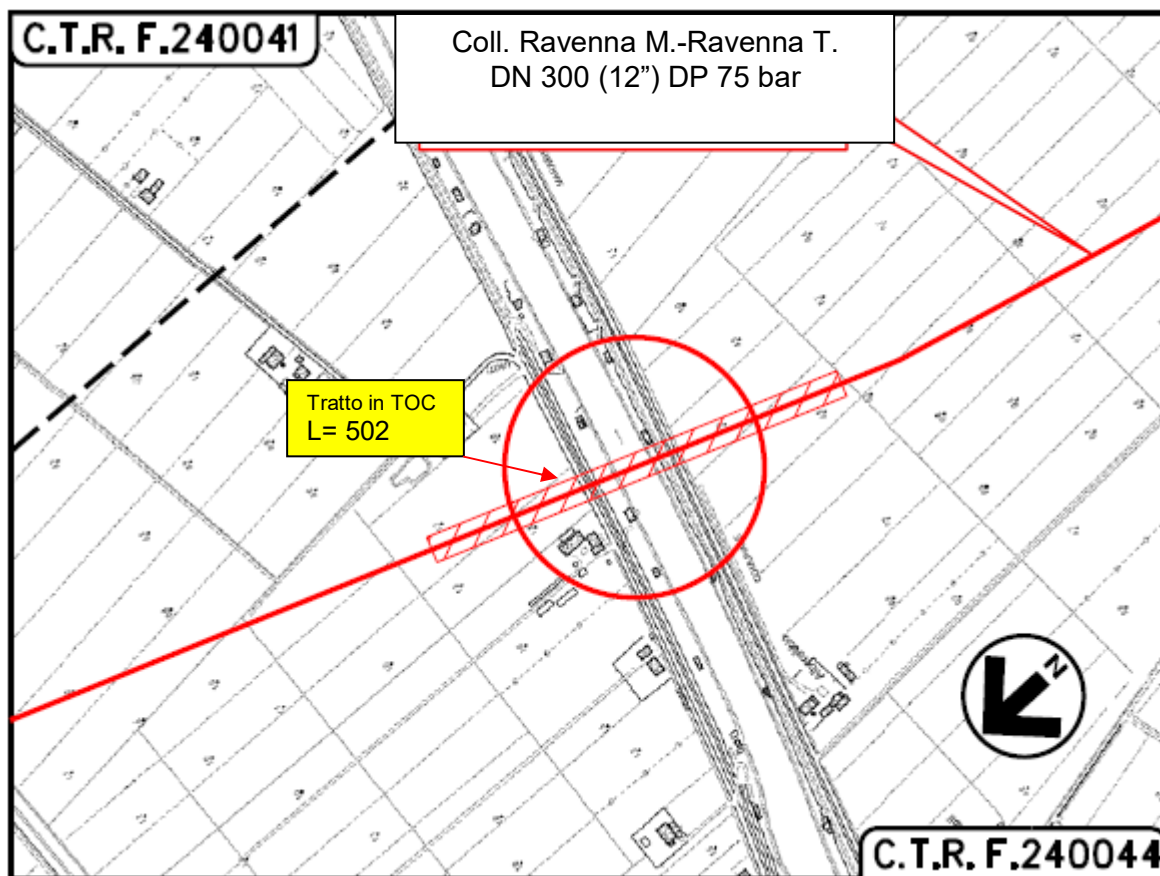


Figura 2a –Localizzazione del sito su CTR 1:10.000

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

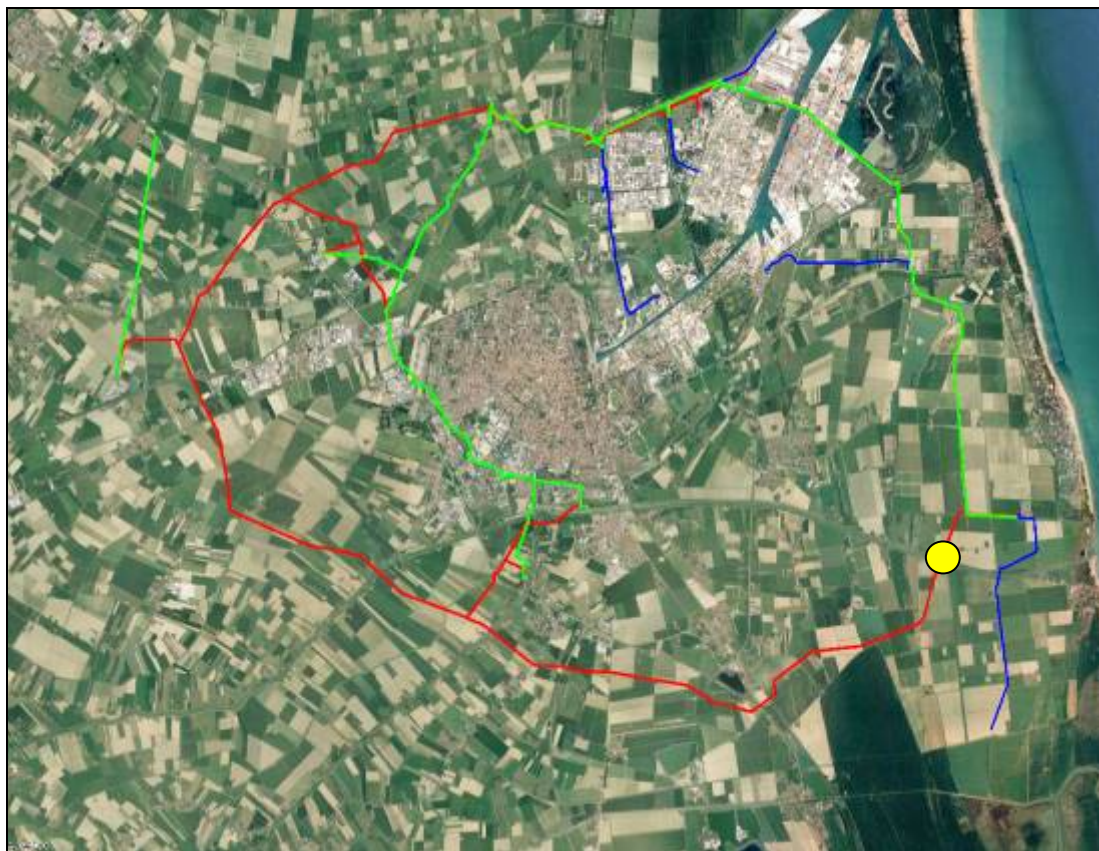


Figura 2 b– Localizzazione della TOC su Immagine aerea (tratta da Google Earth)
(cerchio giallo sito; in rosso tracciato in progetto, in verde tratti da dismettere, in blu tracciati esistenti)

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

3 CARATTERIZZAZIONE GEOMORFOLOGICA E GEOLOGICA

3.1 Inquadramento fisico dell'area

L'area in cui si colloca il tracciato e la TOC in progetto è localizzata nella bassa pianura ravennate, il cui territorio è assimilabile ad un piano debolmente inclinato con immersione E-NE, con lievissime ondulazioni che si manifestano con ampie e blande depressioni a fondo sub pianeggiante, separate da strette zone in leggero rilievo date dai dossi dei corsi d'acqua passati e recenti. Dal punto di vista geologico l'area appartiene al settore romagnolo del Bacino Sedimentario Padano, formato da una successione ciclica di depositi marini, deltizi, lagunari, palustri ed alluvionali di età pliocenico-quaternaria, che poggia su di un substrato con una complessa configurazione a pieghe.

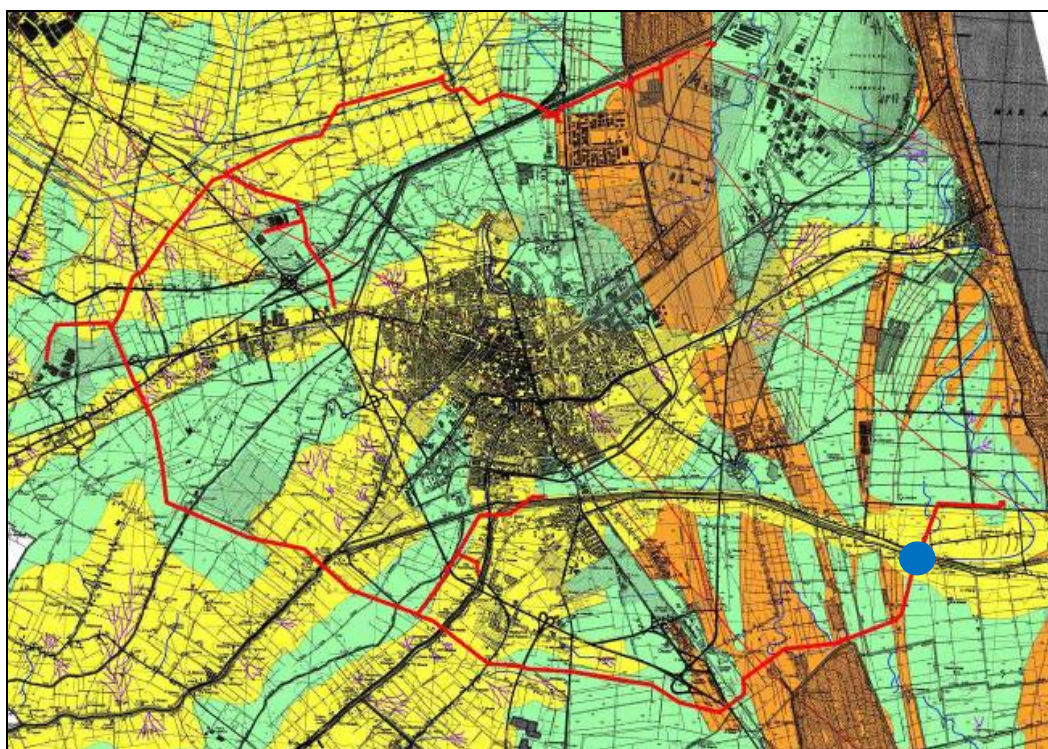


Figura 3 – Stralcio della carta Geomorfologica e Geologica (tratta da POC, 6.I 4.2) con riportato il tracciato
(cerchio blu: TOC; verde: prevalenti limi-argille; giallo: sabbie limose; arancio: sabbie)

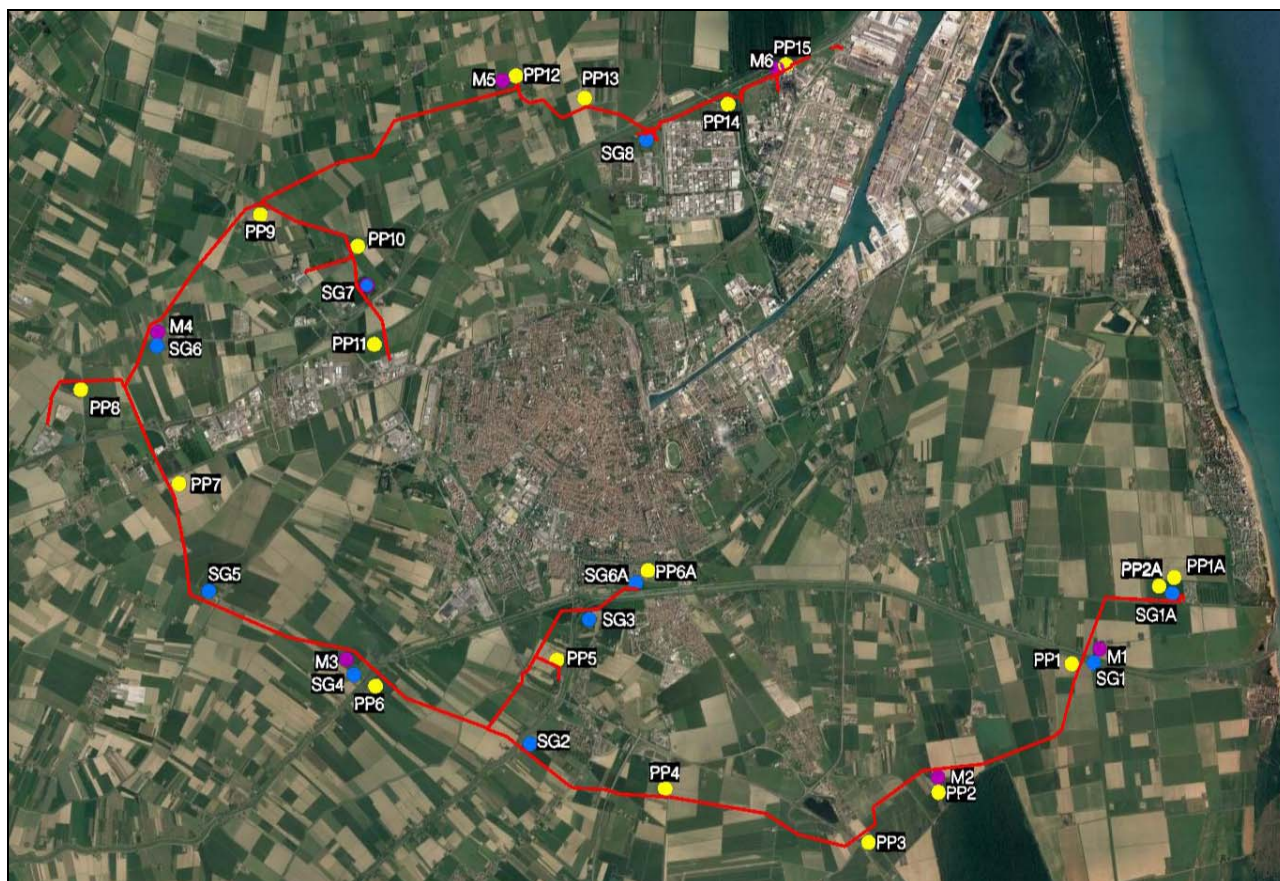
COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

3.2 Caratteristiche stratigrafiche

Le caratteristiche litologiche del sottosuolo in corrispondenza della TOC in esame sono state esplorate tramite un'indagine geognostica consistente in:

- 1 sondaggio geognostico (nominato SG1) ubicato in sinistra idrografica dello attraversamento non lontano dal piede arginale, spinto fino alla profondità di 25 m
- 1 prova CPTU (nominata PP1) ubicata in destra idrografica
- prove di laboratorio geotecnico consistenti in 3 analisi granulometriche, di cui 1 con aerometria.

L'ubicazione delle indagini è riportata nella figura seguente, mentre le stratigrafie e i diagrammi delle indagini in allegato 1.



Localizzazione delle indagini svolte

Le indagini hanno evidenziato la presenza di terreni alluvionali prevalentemente granulari, subordinatamente coesivi, costituiti da sabbia limosa fino alla profondità di 12 m e da limo con sabbia fino alle profondità indagate, come mostrato nel sondaggio SG1 la cui stratigrafia viene riassunta nella tabella seguente.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Sondaggio 1	Profondità (m)
Limo sabbioso	0.00-2.00
Sabbia limosa	2.00-12.00
Limo argilloso con sabbia	12.00-25.00

Tabella 1 – Stratigrafia schematica del sondaggio SG1

3.3 Caratterizzazione geotecnica

La caratterizzazione dei parametri geotecnici si è basata sui risultati delle prove SPT condotti in foro di SG1, delle prove di laboratorio geotecnico e delle elaborazioni della prova CPTU 1.

La dettagliata caratterizzazione geotecnica è riportata nella Relazione Geotecnica COMIS NR/08283-NR/17135-202.

Nella tabella seguente si riportano i risultati delle prove di laboratorio geotecnico.

SONDAGGIO		SG1	SG1	SG1
PROFONDITA' (m)		8,5/9,0	13,5/14,0	20,0/20,5
Contenuto in acqua	%	-	-	-
Massa volumica	Mg/m ³	-	-	-
Massa volumica secca	Mg/m ³	-	-	-
Frazione ghiaiosa	%	0,0	0,0	0,0
Frazione sabbiosa	%	81,4	83,7	5,7
Frazione limosa	%	18,6	16,3	77,3
Frazione argillosa	%			17,0
Limite di liquidità	%	ND	ND	-
Indice di plasticità	%	NP	NP	-
Indice di consistenza	-	-	-	-
Classificazione USCS	-	SM	SM	-
Resistenza al taglio non drenata	kPa	-	-	-

Tabella 2a – Risultati delle prove di laboratorio geotecnico (SG1)

(Nota: le granulometrie per sola setacciatura riportano il valore della frazione limosa+quella argillosa)

Qui nel seguito si riportano i risultati della caratterizzazione geotecnica relativa ai terreni del sito in oggetto e si forniscono i valori dei parametri ricavati.

RIFACIMENTO METANODOTTO RAVENNA MARE – RAVENNA TERRA DN 300 (12") – DP 75 bar ATTRAVERSAMENTO TOC F. U NITI e VIA MARABINA	Pag. 11 di 49
--	---------------

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

SG 1	Profondità (m)	ϕ (°)	c_u (kPa)	M (MPa)	Eed (MPa)
Limo sabbioso	0.00-2.00	28	.	13	
Sabbia limosa	2.00-12.00	31	-	20	-
Limo argilloso	12.00-25.00	24	-	15	-

Tabella 2b - Valori dei parametri geotecnici. Riferimento SG1, CPTU 1

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

4 CRITERI GENERALI DI PROGETTAZIONE

La progettazione di una trivellazione orizzontale controllata richiede, nell'ipotesi che esistano condizioni litologiche del sottosuolo che non la impediscano, come elemento essenziale la definizione del profilo di trivellazione che unisca il punto di entrata con il punto di uscita.

A parte i vincoli di carattere territoriale ed ambientale, dal punto di vista tecnico ciò comporta effettuare una serie di verifiche ed operare delle scelte che dipendono dalle caratteristiche morfologiche, litologiche e geotecniche del sito, nonché dalle proprietà meccaniche e geometriche della tubazione da installare.

In sintesi si devono considerare i seguenti aspetti:

- o localizzazione dei punti di entrata e uscita
- o profondità in corrispondenza di punti critici
- o raggi di curvatura
- o angoli di ingresso e di uscita
- o individuazione del corridoio litologicamente idoneo
- o resistenza del terreno alla pressione dei fanghi
- o rischio di sifonamento degli argini (se esistenti)
- o verifica dei cedimenti indotti.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

5 SCELTA DEL PROFILO DI TRIVELLAZIONE

5.1 Localizzazione dei punti di entrata e di uscita

I punti estremi della trivellazione vengono scelti sulla base delle esigenze di sottopassare in profondità “ostacoli” che non è possibile attraversare in superficie con tecnica tradizionale (corsi d'acqua, strade, ferrovie, zone sensibili, ecc.).

In corrispondenza di tali punti, punto di ingresso e punto di uscita della trivellazione, deve esserci sufficiente spazio per realizzare temporanee aree di lavoro, in genere più estesa quella di ingresso dove si posizionano il rig e tutte le attrezzature di trivellazione.

Naturalmente tali aree, la cui estensione dipende dalla potenza del rig da impiegarsi e dalla lunghezza della trivellazione, devono risultare accessibili, o rese facilmente accessibili, ai mezzi di lavoro e di trasporto ed essere possibilmente a morfologia pianeggiante o comunque poco acclive al fine di minimizzare i movimenti terra e successivi ripristini.

L'area di uscita deve essere posizionata in modo che sia disponibile adeguato spazio per la predisposizione di una pista ove stendere l'intera stringa di varo, in allineamento con la direzione di uscita della TOC e possibilmente di lunghezza non inferiore a quella della TOC. In caso di indisponibilità di sufficiente spazio può essere valutata la possibilità di predisporre la stringa in due o più spezzoni, soluzione che però si preferisce evitare in presenza di terreni sciolti soprattutto per TOC di largo diametro.

Inoltre, nel caso esista una apprezzabile differenza di quota tra punto di entrata e punto di uscita, risulta preferibile, se possibile, posizionare il rig nella posizione meno elevata al fine di facilitare il recupero dei detriti, impiegando una pressione più ridotta alla testa di trivellazione con minor rischio di perdite/venute a giorno di fango di perforazione.

Per la trivellazione in progetto si è scelto di posizionare il punto di ingresso a valle, senso gas, cioè in sinistra idrografica ad una distanza di circa 190 m dal piede dell'argine. Qui la morfologia è assolutamente pianeggiante per poter realizzare la piazzola di lavoro, di facile accesso ai

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

mezzi. Tale soluzione deriva dalla disponibilità lato valle di uno spazio per la stringa più adeguato, con morfologia anch'essa del tutto piatta.

5.2 Profondità del profilo

La metodologia della trivellazione orizzontale controllata viene vantaggiosamente utilizzata per sottopassare ostacoli di carattere naturale, quali fiumi, specchi d'acqua, aree franose, zone ambientalmente di pregio, ecc. o di natura antropica, come strade, ferrovie, canali, costruzioni varie, ecc. in modo da arrecare con i lavori il minor danno possibile.

La profondità che si deve assegnare al profilo di trivellazione dipende da una parte dal margine di sicurezza che si vuole tenere in corrispondenza di tali punti critici da sottopassare e dall'altra da esigenze di carattere geotecnico intrinseche alla trivellazione.

In merito alla profondità da tenere al di sotto degli "ostacoli", se si tratta di corsi d'acqua o frane, occorre valutare rispettivamente tramite adeguate verifiche di tipo idraulico o geotecnico la probabile evoluzione morfologica planoaltimetrica dell'alveo o la profondità della superficie di scivolamento, tenendo presente un orizzonte temporale adeguato alla vita del metanodotto.

Se si parla invece di opere antropiche, necessita valutare invece l'eventuale interferenza di possibili effetti indotti dalla trivellazione di carattere persistente, quali cedimenti, oppure transitorio, ma da evitare assolutamente, quali venute a giorno di fango durante la perforazione in zone su cui insistono per l'appunto tali opere.

Un altro aspetto importante da tenere in debito conto, spesso però sottovalutato, è quello relativo alla resistenza del terreno nei confronti della pressione dei fanghi di trivellazione, di cui si riferisce successivamente. Tale aspetto va affrontato in fase progettuale in quanto condiziona la scelta del profilo di trivellazione. Infatti una TOC troppo superficiale può determinare la rottura del terreno sovrastante con venuta a giorno dei fanghi e conseguenti danni ambientali.

Il profilo di progetto per l'attraversamento dei Fiumi Uniti in studio è stato verificato per quanto riguarda la resistenza del terreno alla pressione operativa dei fanghi. In merito alle profondità al di sotto del corso d'acqua, è risultato che la TOC sottopassa:

RIFACIMENTO METANODOTTO RAVENNA MARE – RAVENNA TERRA DN 300 (12") – DP 75 bar ATTRaversAMENTO TOC F. U NITI e VIA MARABINA	Pag. 15 di 49
--	---------------

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

- o L'alveo del corso d'acqua dei Fiumi Uniti ad una profondità che consente uno spessore di copertura di 14.95 m
- o I piedi esterni degli argini ad una profondità che consente una copertura di circa 22 m.

5.3 Raggi di curvatura

Il profilo di trivellazione, tipicamente di forma concava, implica la presenza di tratti curvilinei. La scelta del raggio minimo in tali tratti dipende dalle caratteristiche:

- o geometriche della tubazione: diametro esterno, spessore di parete e pertanto diametro interno
- o meccaniche dell'acciaio impiegato: modulo di elasticità e resistenza (SMYS)
- o geologiche del sottosuolo: la consistenza/addensamento del terreno (quindi la "capacità portante") è un elemento altamente condizionante la reazione che esso può opporre alla trivellazione in fase di curvatura.

Il raggio di curvatura minimo della trivellazione, definito in fase progettuale, dipende in primo luogo dal raggio elastico minimo sopportabile dalla tubazione moltiplicato per un fattore (generalmente 2) che permetta in fase di esecuzione della TOC di poter correggere in corso d'opera eventuali variazioni di profilo rispetto al profilo di progetto.

Il raggio di curvatura minimo della condotta ($R_{\min, \text{pipe}}$) si valuta tramite la seguente relazione:

$$R_{\min, \text{pipe}} = (D_e \cdot E) / 2 \left((SMYS / F_s - (P \cdot D_i / 10) / 4W_{th}) \cdot 1000 \right) \quad (1)$$

dove: D_e = diametro esterno

D_i = diametro interno

W_{th} = spessore di parete

SMYS= specified minimum yield strength

P= pressione interna massima

$F_{s, st}$ = fattore di sicurezza relativo al calcolo di resistenza dell'acciaio, usualmente posto pari a 1.5.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

Il raggio minimo di progetto della trivellazione ($R_{\min, HDD}$) si assume pari a:

$$R_{\min, HDD} = R_{\min, pipe} \cdot F_{s, dr} \quad \text{con } F_{s, dr} \text{ pari usualmente a } 2 \quad (2)$$

In secondo luogo, per i larghi diametri > 400 mm, in accordo con le raccomandazioni DCA (Drilling Construction Association), il raggio minimo di progetto deve tener conto della reazione che il terreno può offrire secondo la seguente relazione, espressa in forma grafica in figura 4:

$$R_{\min} = C \cdot (D_e \times W_{th})^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

in cui C = coefficiente di capacità portante funzione del tipo di terreno con valore compreso tra 8500 e 12500.

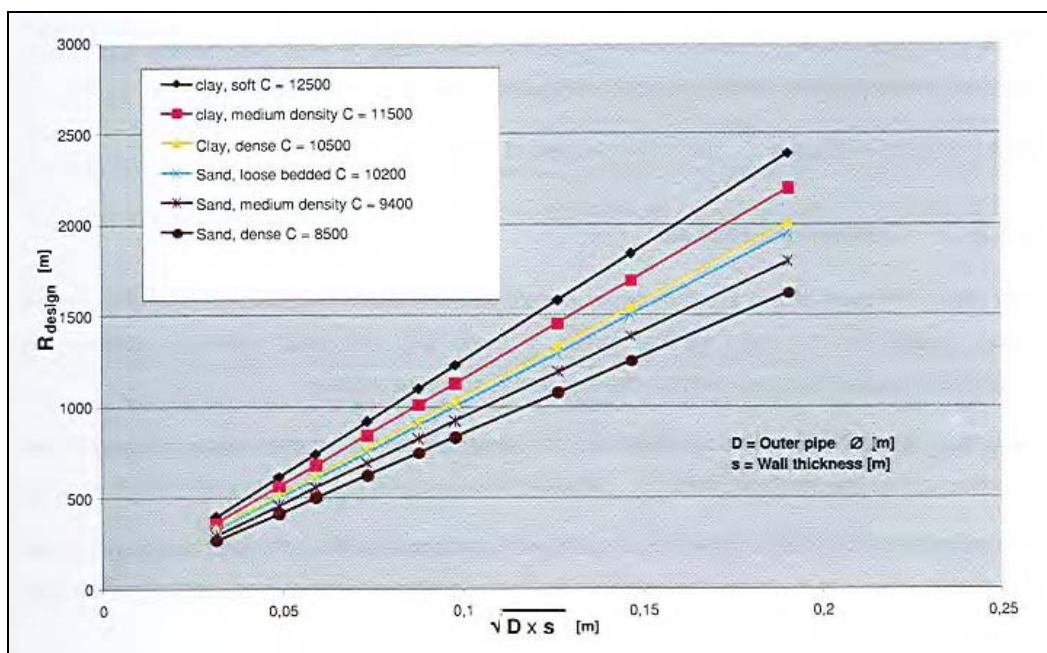


Figura 4 - Grafico di dimensionamento del Raggio in funzione del tipo di terreno, in accordo con DCA 2009

Un confronto di carattere generale dei risultati ottenuti tramite le valutazioni sopradescritte può essere effettuato mediante:

- o “good engineering practice”, secondo cui il raggio può essere assunto pari a 1 m per millimetro di diametro della tubazione
- o valori consigliati da “La costruzione di condotte in acciaio” predisposto da Snam (v. Fig. 5).

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

VALORI CONSIGLIATI PER IL DIMENSIONAMENTO DEL PROFILO DELLA PERFORAZIONE			
DIAMETRO CONDOTTA (mm)	RAGGIO MINIMO (mm)	ANGOLO D'INGRESSO MASSIMO	ANGOLO D'USCITA MASSIMO
< 200	250	18°	16°
250 ÷ 300	350 ÷ 400	18°	14°
350 ÷ 400	450 ÷ 500	14°	12°
450 ÷ 500	550 ÷ 600	12°	10°
550 ÷ 600	650 ÷ 700	12°	8°
650 ÷ 700	800 ÷ 850	10°	8°
750 ÷ 800	850 ÷ 950	8°	6°
850 ÷ 900	900 ÷ 1000	8°	6°
950 ÷ 1000	1000 ÷ 1100	6°	4°
1050 ÷ 1100	1100 ÷ 1200	6°	4°
1200 ÷ 1400	> 1400	6°	4°

Figura 5 – Valori consigliati per la scelta del raggio minimo di perforazione (da Snam: La costruzione di condotte in acciaio: Le tecnologie trenchless)

Per la TOC in progetto si userà una tubazione in acciaio delle seguenti caratteristiche:

- o D_e = diametro esterno (323.9mm)
- o D_i = diametro interno (304.9 mm)
- o W_{th} = spessore di parete (9.5 mm)
- o SMYS= specified minimum yield strength= 415 MPa
- o P = pressione interna massima= 75 bar

Il terreno in cui si svilupperà la tubazione avrà un coefficiente di capacità portante minimo pari a: $C = 10.200$

Dalle verifiche effettuate con le relazioni soprariportate (1) e (2) risultano i seguenti valori:

- o $R_{min, pipe} = 175$ m
- o $R_{min, HDD} = 350$ m

Tale ultimo valore del raggio di trivellazione è da prendersi come riferimento minimo per i tratti in curva della TOC in oggetto. Esso soddisfa pure la soprariportata relazione empirica (3) ed è in accordo con i valori consigliati nella tabella di Fig. 5 (tratta da Snam).

Si sottolinea che tale ultimo valore di 350 m si riferisce al caso di condotta in esercizio, pertanto soggetta alla pressione esterna del terreno e interna del gas.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

Invece la condotta in fase di lavoro e priva di pressione interna del gas può sopportare raggi di curvatura anche di 175 m (già comprensivo di $F_s=1.5$).

Si tenga però presente che il raggio di curvatura minimo è da riferirsi alla curva reale della trivellazione nel piano in cui essa si sviluppa. Qualora la curva avesse anche una componente nel piano orizzontale, come nel caso in esame, il raggio reale (chiamato *raggio combinato* R_{com}) va calcolato come la risultante della componente verticale e di quella orizzontale tramite la seguente relazione:

$$R_{com} = ((R_h^2 * R_v^2) / (R_h^2 + R_v^2))^{0.5}$$

Nel caso specifico il progetto prevede per il profilo della TOC dei valori molto prudentiali: un raggio nel piano verticale pari a 850 m e nessuna curvatura planimetrica. In fase di lavoro si prevede di dare al tratto di tubazione nella curva di varo un raggio di 420 m.

5.4 Angoli di ingresso e di uscita

L'angolo di ingresso non ha limitazioni particolari, se non quelle legate alle caratteristiche del rig impiegato. In linea generale gli angoli possono andare da 6° a 18°, con tendenza ad usare i valori più bassi per le condotte di maggior diametro.

L'angolo di uscita è strettamente condizionato dal diametro della tubazione nel senso che da esso dipende l'altezza (ed anche la lunghezza) della curva di varo (*overbend*). Pertanto l'inclinazione in uscita in genere viene contenuta in modo tale che l'altezza dell'*overbend* non ecceda valori di normale operatività. Se ciò tuttavia non fosse possibile, si può fare ricorso a particolari strutture di sostegno della stringa di varo, quali rilevati, impalcature, ecc..

Per il calcolo dell'altezza della curva di varo (H_{over}) si fa riferimento alla seguente formula:

$$H_{over} = R_{over} * (1 - \cos \alpha_{out}) - Z_{pit}$$

dove: R_{over} = raggio della curva di varo, che può essere assunto non inferiore al raggio elastico della tubazione ($R_{min, pipe}$)

α_{out} = angolo di uscita

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

z_{pit} = profondità del pozzetto di ricevimento.

Per la TOC in oggetto si sono assunti:

- o angolo di ingresso $\alpha_{in} = 10^\circ$
- o angolo di uscita $\alpha_{out} = 9^\circ$

La curva di varo risulta come dalla figura seguente (v. Fig. 6).

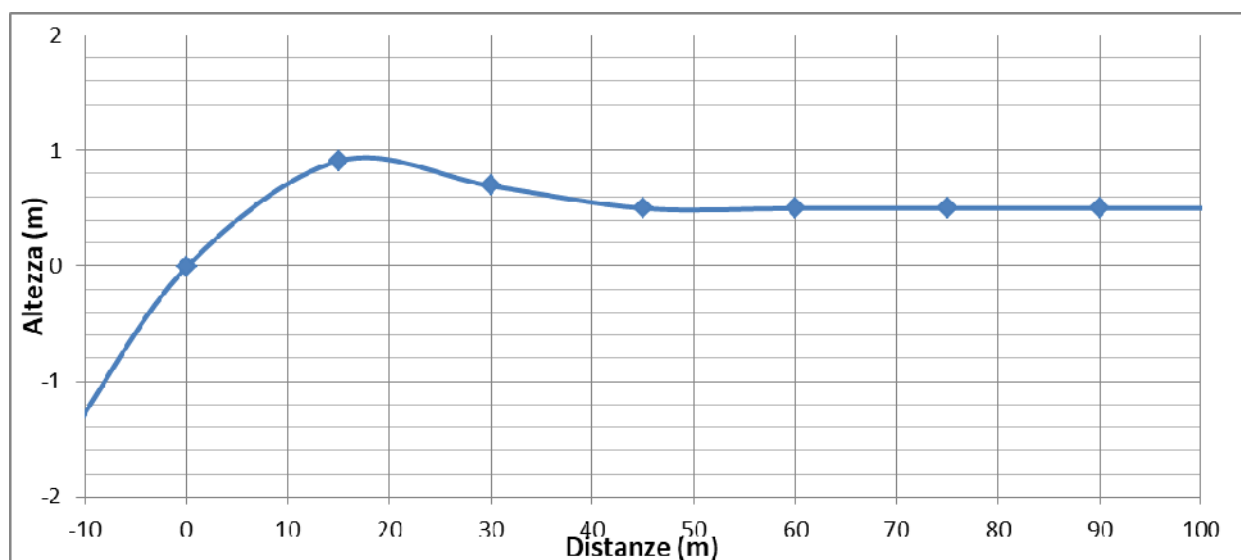


Figura 6 – Grafico della curva di varo nell'ipotesi di angolo di uscita di 9° e raggio= 200 m

Le caratteristiche della curva di varo, nella ipotesi di angolo di uscita di 9° , raggio 200 m, sono le seguenti:

- o altezza massima= 0.96 m sul punto di uscita, alla distanza di 20 m
- o distanza al punto di flesso= 29 m
- o lunghezza totale= 39 m.

5.5 Individuazione del corridoio litologicamente idoneo

Oggigiorno le TOC possono essere realizzate in una grande varietà di terreni e di rocce, utilizzando utensili di trivellazione, apparecchiature e composizione dei fanghi adeguate al materiale da attraversare (v. Fig. 7).

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Grossi limiti però sono posti dalla presenza di materiale incoerente grossolano, quale ghiaia e ciottoli con scarsa presenza di matrice fine, oppure roccia intensamente fratturata. In queste tipologie di terreni il fango di trivellazione riesce ad estrarre per fluitazione solo la matrice mentre i frammenti grossolani rimangono in foro, depositandosi sul fondo. Il rischio, anche nel caso si riuscisse ad ultimare il foro, è che la condotta in fase di tiro rimanga incastrata nel foro e comunque possa risultare seriamente danneggiata nel rivestimento per la frizione con il materiale grossolano che ostruisce il cavo.

Nel caso in oggetto la situazione stratigrafica (v. Relazione Geologica Comis, NR/08283/NR/17135-200) vede la presenza di terreni prevalentemente incoerenti sabbiosi-limosi fino alla profondità di 12 m circa, ai quali sottostanno terreni granulometrici più fini argillo-limosi fino alle profondità indagate (25 m); entrambi le tipologie di terreno, idonea all'applicazione del metodo TOC, saranno attraversate dal profilo in progetto.

TABLE 2-1 HDD Feasibility Guidelines		
Earth Material	Gravel % by Weight	HDD Feasibility
Very soft to hard strength, possibly slickensided clay	NA	Good to Excellent. Penetration of strong clay surrounded by looser soils may result in the bit skipping at the interface. Bit steering may be difficult when passing through soft soil layers.
Very loose to very dense sand with or without gravel traces.	0 to 30	Good to Excellent. Gravel may cause steering problems.
Very loose to very dense gravelly sand.	30 to 50	Marginal. In these conditions drilling fluid characteristics are critical to success. Bit steering may be inaccurate.
Very loose to very dense sandy gravel.	50 to 85	Questionable. Horizontal penetration for any appreciable distance will be extremely difficult. Bit steering will be inaccurate.
Very loose to very dense gravel.	85 to 100	Unacceptable. With current technology horizontal penetration is almost impossible. This type of material must be avoided or penetrated at a steep angle.
Rock	NA	Excellent to Unacceptable. Softer or weathered materials offer good HDD characteristics. Penetrating solid rock after passing through soil may be difficult due to the bit's tendency to skip on the lower hard surface. Rock in the rounded cobble form is almost impossible to drill.

Figura 7 - Fattibilità delle TOC in funzione del tipo di terreno (da Horizontal Directional Drilling, Utility and Pipeline Applications)

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

6 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

La trivellazione orizzontale controllata in progetto per l'installazione della condotta del metanodotto collegherà il punto di entrata ubicato in sinistra idrografica ad di là del piede arginale di circa 190 m con il punto di uscita localizzato in destra ad una distanza di circa 210 m dal piede arginale, permettendo di sottopassare in profondità l'alveo dei Fiumi Uniti e i relativi rilevati arginali.

La metodologia TOC che si intende utilizzare si articola secondo le seguenti fasi (v. Fig. 8):

- esecuzione in spinta da parte del rig di perforazione del foro pilota
- alesatura del foro pilota eseguita in tiro con uno o più passaggi di uno specifico alesatore
- tiro entro il cavo alesato della colonna di tubazione pre-allestita.

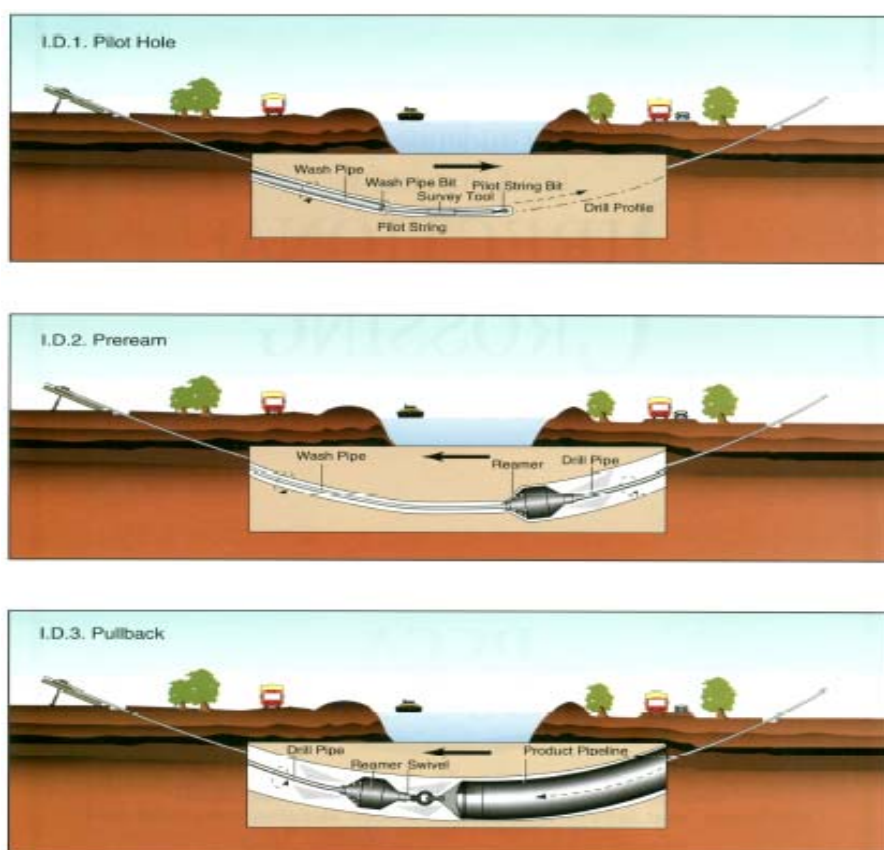


Figura 8: schema delle fasi in cui si articola la T.O.C.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

Le caratteristiche geometriche della TOC, raffigurate negli elaborati di progetto, sono sintetizzate qui di seguito:

- lunghezza planimetrica della trivellazione: 499.34 m
 - lunghezza reale: 502.19 m
- di cui:
- o tratto rettilineo iniziale inclinato 10° 51.95 m
 - o tratto curvilineo iniziale $R_v = 850$ m 148.35 m
 - o tratto rettilineo centrale orizzontale 90.75 m
 - o tratto curvilineo finale $R_v = 850$ m 119.02 m
 - o tratto rettilineo finale inclinato 9° 92.12 m

La stringa di varo potrà essere predisposta in un'unica soluzione rettilinea sulla pianura in destra del fiume.

Dal punto di vista operativo, stante la dimensione del tubo del metanodotto da installare, risulta più conveniente effettuare il tiro della condotta zavorrandola con acqua, cui corrisponderebbe uno sforzo di tiro dell'ordine di 30 t. Si ritiene pertanto necessario un rig da almeno 60 t di capacità di tiro, comunque da valutare da parte dell'impresa.

Il diametro del cavo da realizzare dovrà essere non inferiore a 400 mm. Ciò implica realizzare almeno un passaggio di alesatura, una volta concluso il foro pilota.

La composizione e la gestione dei fanghi dovranno essere particolarmente rivolte a mantenere i corretti parametri reologici, in considerazione anche del fatto che il detrito di perforazione potrebbe contenere anche una certa percentuale di materiale argilloso, difficile da separare dal fango bentonitico di perforazione e che produce pertanto rapido scadimento delle caratteristiche di quest'ultimo.

Comunque sarà l'Appaltatore, sulla base della sua esperienza e dell' equipaggiamento di cui dispone, scegliere le idonee attrezzature, i diametri e le modalità operative da impiegare in funzione della reale situazione del sottosuolo.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

7 PLASTICIZZAZIONE DEL TERRENO

7.1 Generalità

Durante l'esecuzione della T.O.C., sia in fase di foro pilota che d'alesatura e tiro, nel foro viene mantenuta una pressione dei fanghi più elevata di quella presente nel terreno allo scopo di conferire stabilità al cavo e di permettere un flusso continuo dei fanghi con asportazione dei cuttings di perforazione.

Quando tale pressione raggiunge certi livelli, essa provoca la deformazione plastica dei terreni nell'intorno al foro; poi, superati tali valori, la zona con deformazioni plastiche via via si allarga arrivando alla rottura del terreno e conseguentemente alla perdita di circolazione dei fanghi.

I meccanismi di flusso sono essenzialmente due: il primo è associato ad una generale rottura al taglio dei terreni che genera un flusso plastico non confinato nell'intorno del foro, chiamato *blow-out*; l'altro determina l'apertura di vere e proprie fratture lungo le quali si instaura il flusso, noto con il nome di *hydrofracture* (Hongwey Xia and D. Moore, 2007).

Nel caso di attraversamento di corsi d'acqua, necessita verificare che le zone interessate da deformazioni del terreno a seguito della pressione dei fanghi non siano tanto estese da arrivare in superficie e in particolare ad interessare il fondo alveo.

7.2 Metodologia

L'approccio teorico, noto con il nome di *Formula di Delft* (H.J. Luger and H. J. A. M. Hergarden, 1988), è basato sulla analisi della zona plasticizzata intorno al foro (teoria dell' espansione della cavità) con le seguenti assunzioni: il foro presenta simmetria assiale, il mezzo è omogeneo, isotropo, di dimensioni infinite ed elastico fino l'instaurarsi della rottura, definita secondo il criterio di Mohr-Coulomb come funzione della coesione e dell'angolo di attrito.

Tale formula fornisce la pressione massima sostenibile nei confronti del verificarsi dei fenomeni di rottura del terreno e conseguenti perdite di circolazione. Essa si differenzia in funzione del tipo di materiale: per terreni granulari e per terreni coesivi.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Terreni granulari, condizioni drenate

La pressione massima efficace è data dalla seguente relazione:

$$p_{max} = (p'_r + c_f \cdot \cot \phi_f) \cdot \left[(R_b/R_{p,max})^2 + Q \right]^{(-\sin \phi / 1 + \sin \phi)} - c_f \cdot \cot \phi_f + u$$

dove:

$$Q = (\sigma'_0 \cdot \sin \phi + c_f \cdot \cot \phi_f) \cdot 1/G$$

$$p'_r = \sigma'_0 \cdot (1 + \sin \phi) + c_f \cdot \cot \phi_f$$

$$c_f = \text{coesione fattorizzata} = c/f_c \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

f_c = fattore di sicurezza della coesione

$$c = \text{coesione media (kN/m}^2\text{)}$$

$$\phi_f = \text{angolo di attrito fattorizzato} = \arctan(\tan \phi / f_\phi) \text{ (}^\circ\text{)}$$

f_ϕ = fattore di sicurezza dell'angolo di attrito

$$\phi = \text{angolo di attrito medio (}^\circ\text{)}$$

$$\sigma'_0 = \text{pressione effettiva} = \frac{3}{4} \cdot \sigma'_v / f_\gamma \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$\sigma'_v = \text{pressione verticale effettiva (kN/m}^2\text{)}$$

f_γ = fattore di sicurezza del peso di volume del materiale

$$G = \text{modulo di taglio} = E / (2(1 + \nu)) \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

$$R_b = \text{raggio del foro (m)}$$

$$R_{p,max} = \text{raggio massimo ammissibile della zona plastica} \leq 2/3 h \text{ (m)}$$

$$h = \text{profondità del centro foro (m)}$$

$$u = \text{pressione neutra (kPa)}$$

Terreni coesivi, condizioni non drenate

La pressione massima è data dalla seguente relazione:

$$p_{max} = \sigma'_0 + C_{uf} \cdot [1 - \ln(C_{uf}/G + (R_b/R_{p,max})^2)] + u$$

dove:

$$C_{uf} = \text{coesione fattorizzata} = C_u / f_c \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

f_c = fattore di sicurezza della coesione

$$C_u = \text{coesione media (kN/m}^2\text{)}$$

$$\sigma'_0 = \text{pressione effettiva} = \frac{3}{4} \cdot \sigma'_v / f_\gamma \text{ (kN/m}^2\text{)}$$

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

σ'_v = pressione verticale effettiva (kN/m²)

f_γ = fattore di sicurezza del peso di volume del materiale

G= modulo di taglio= $E/(2(1+\nu))$ (kN/m²)

E= modulo elastico (kN/m²)

ν = rapporto di Poisson

R_b = raggio del foro (m)

$R_{p,max}$ = raggio massimo ammissibile della zona plastica $\leq 1/2 h$ (m)

h= profondità del centro foro (m)

u= pressione neutra (kPa)

Con tali relazioni è pertanto determinabile il raggio della zona plastica in funzione della pressione dei fanghi utilizzata ed inoltre la pressione limite p_{lim} , che verrebbe indotta nell'ipotesi di una plasticizzazione senza confini.

Si assume come pressione massima ammissibile p_{max} la pressione minore tra le seguenti:

- quella pari al 90% della pressione limite p_{lim}
- quella per la quale si determina il raggio di influenza massimo ammissibile, pari a $1/2 h$ per i terreni coesivi e per $2/3 h$ per i terreni granulari, essendo h lo spessore di copertura al di sopra dell'asse della trivellazione.

In caso la pressione del terreno non fosse sufficiente a bilanciare quella operativa dei fanghi (di seguito trattata), si procede modificando il profilo di trivellazione in modo da assicurare uno spessore di copertura maggiore che offra una sufficiente resistenza all'azione della pressione dei fanghi nel cavo scongiurando fenomeni di disturbo ai terreni che possano arrivare fino in superficie.

La pressione operativa dei fanghi (p_{oper}) è la pressione minima che deve essere esercitata nel cavo anulare di perforazione al fine di consentire le operazioni per la realizzazione della TOC.

La verifica delle pressioni dei fanghi nelle varie fasi di perforazione consiste pertanto nel calcolo della pressione operativa e nel suo confronto con la pressione massima che il terreno può sostenere.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Si fa presente che le condizioni più critiche si determinano in corrispondenza della fase di perforazione del foro pilota, quando a causa delle ridotte dimensioni del foro stesso si hanno forti perdite di carico e pertanto necessitano le massime pressioni dei fanghi.

La pressioni dei fanghi p_{oper} che deve essere applicata, variabile con la distanza L dal punto di perforazione e con la relativa profondità h , può essere così distinta:

$$p_{oper} = p_1 + p_2$$

dove:

$$p_1 = \gamma_f \cdot h$$

pressione idrostatica del fango a seguito del dislivello da coprire

$$p_2 = dp/dz \cdot L$$

pressione dovuta alla perdita di carico nell'anello tra foro ed aste di perforazione

in cui

γ_f = peso di volume dei fanghi con in sospensione i detriti di perforazione

dp/dz = perdita di carico unitaria, valutata sulla base dei parametri geometrici dell'anello (cioè diametro del foro e diametro delle aste) nonché sulle caratteristiche reologiche del fluido di perforazione (cioè Viscosità Dinamica e Yield Point).

7.3 Calcolo della perdita di carico

La perdita di carico unitaria lungo la cavità anulare è stata calcolata utilizzando il programma MudWare v. 3 utilizzando come input le caratteristiche reologiche del fango di perforazione e le dimensioni della cavità.

Basandoci sulle esperienze acquisite in perforazioni in terreni simili, si sono determinati i valori dei parametri reologici che verosimilmente avrà il fango di perforazione, valori che sarà cura del tecnico preposto mantenere nel confezionamento dei fanghi (v. Fig. 9).

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

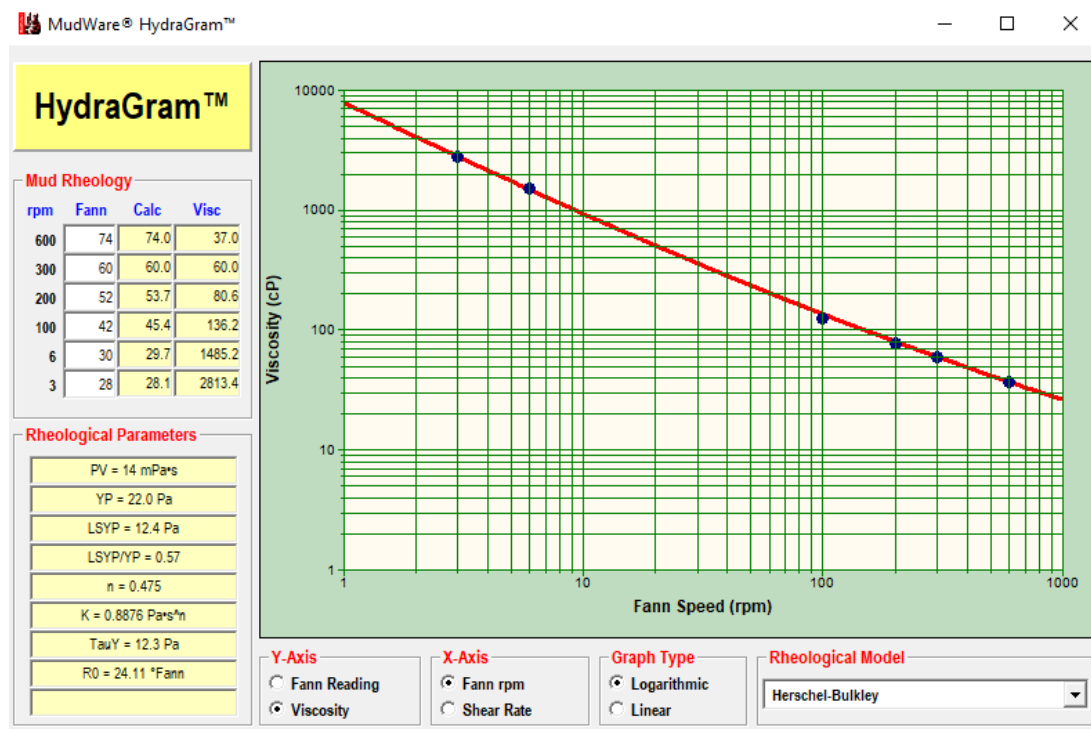


Figura 9 – Caratteristiche reologiche del fango di perforazione in corrispondenza dei terreni sabbiosi, sabbiosi-limosi

Pertanto i dati di input per il calcolo della perdita di carico sono i seguenti:

- Terreno sabbioso: pV= 16 YP= 15
- Terreno coesivo: pV= 8 YP= 30
- D_{hole}= 12 ¼" (311 mm)
- D_{drill pipe}= 5" (127 mm)

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

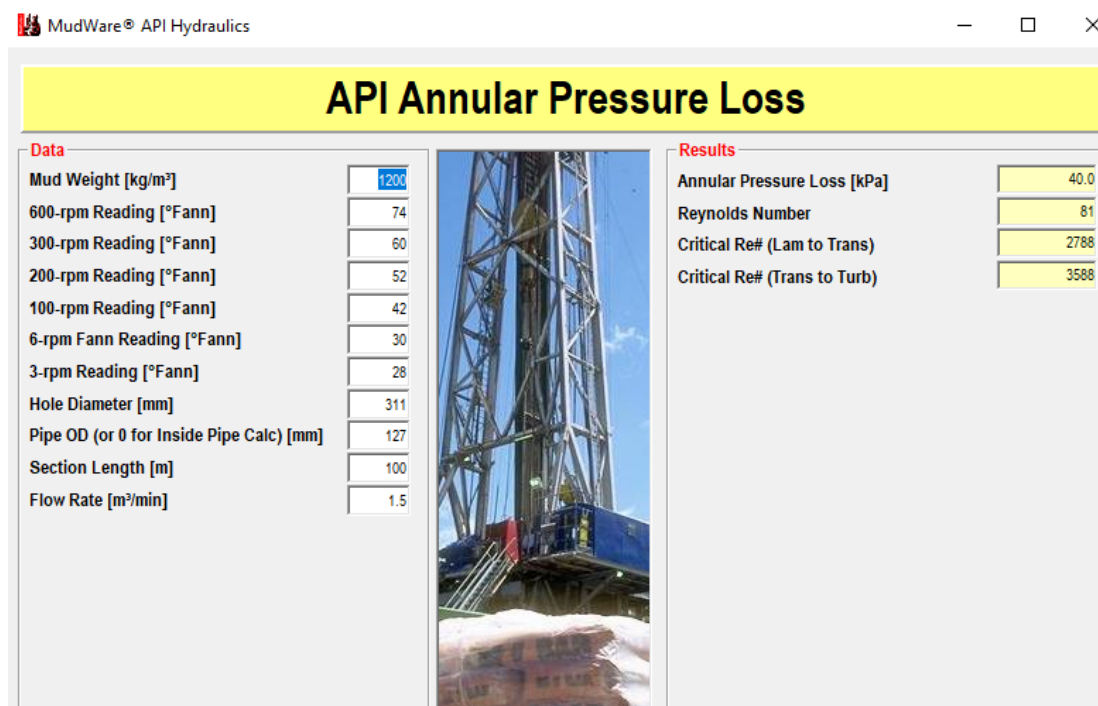


Figura 10 – Risultati del calcolo di caduta di pressione nell’anello per terreni sabbiosi, sabbio-limosi

Come evidenziato in figura 10, i calcoli forniscono il valore di perdita unitaria di pressione pari a:

$uP_{\text{loss}} = 0.40 \text{ kPa/m}$ per terreni sabbiosi, sabbio-limosi, limo-argillosi.

7.4 Calcoli e risultati

La verifica è stata effettuata lungo il percorso di trivellazione della T.O.C. per il quale sono state calcolate:

- la pressione idrostatica dei fanghi, funzione della profondità rispetto alla posizione del rig
- le perdite di carico lungo il percorso anulare, funzione della geometria dell’anello e delle caratteristiche del fango
- la pressione totale, somma delle due precedenti, necessaria per la trivellazione (*pressione operativa*)
- la pressione massima ammissibile, sopportabile dal terreno nei confronti delle venute a giorno dei fanghi (*pressione max blow out*).

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

I parametri geotecnici dei terreni incontrati sono stati desunti dalle elaborazioni delle indagini svolte allo scopo.

In considerazione della presenza di terreni sabbiosi-limosi con subordinata presenza di terreni coesivi, si ipotizza una trivellazione condotta con lenti avanzamenti che permetta ai terreni di sviluppare le resistenze in condizioni drenate. In tale ipotesi nei calcoli della pressione ammissibile la resistenza del terreno è stata caratterizzata attribuendo un valore di resistenza al taglio di tipo attritivo, assunto come media tra i terreni previsti.

I valori dei parametri geotecnici di input in tal modo assunti, mediati tra quelli dei vari litotipi attraversati, sono riportati nella tabella seguente (Tab. 2):

γ_s	ϕ'	c'	E	ν
kN/m ³	(°)	kPa	MPa	
20	28	0	17000	0.33

Tabella 2 – Valori dei parametri geotecnici

Inoltre per il calcolo della caduta di pressione lungo lo spazio anulare si è supposto l'uso di una testa di trivellazione di diametro sufficiente largo, tale da minimizzare i valori di perdita di pressione a non più di 0.40 kPa/m.

Dal momento che ad una diminuzione della superficie dello spazio anulare corrispondono pressioni di esercizio più elevate, l'impresa esecutrice dei lavori dovrà operare una scelta di tali parametri in modo oculato al fine di minimizzare il rischio di fuoriuscite dei fanghi.

Dal confronto delle curve ottenute dalle verifiche, riportate nelle figure 11 e 12, si evidenzia che la pressione operativa dei fanghi risulta sempre inferiore rispetto a quella ammissibile, ad eccezione dell'ultimo tratto di trivellazione di circa 35 m dove, a causa della sempre minore copertura di terreno sopra il foro e della maggiore pressione dei fanghi necessaria per far tornare il flusso verso il rig, la pressione massima ammissibile viene superata. Questo non

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

significa che si avranno necessariamente venute a giorno di fanghi, ma che i margini di sicurezza assunti risultano superati.

Per tale motivo in corrispondenza del tratto terminale della perforazione si adotteranno adeguate precauzioni per contenere, qualora si verificassero, le fuoriuscite di fango. In particolare si dovrà tenere pronto un escavatore per realizzare arginelli di contenimento e predisporre, in anticipo, una vasca in terra dove accumulare l'eventuale fluido fuoriuscito che successivamente dovrà essere asportato.

L'impiego del sistema di misura della pressione dei fanghi durante la perforazione (PWD garantirà lungo l'intero percorso il controllo dei valori della pressione stessa effettivamente esercitata alla testa di trivellazione in modo da permettere il suo mantenimento entro i valori di sicurezza. Inoltre sarà buona precauzione l'utilizzo di due contatori volumetrici che leggano in contemporanea il volume dei fanghi immessi nel foro e quelli recuperati dal foro, in modo da valutare in tempo reale l'eventuale perdita di fluidi, campanello di allarme principale in caso di fratturazione del terreno intorno al cavo con rischio di successiva venuta a giorno degli stessi.

La curva di varo è rappresentata in figura 13; con l'angolo di ingresso della tubazione pari a 9° e raggio= 420 m essa sarà alta 3.67 m.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

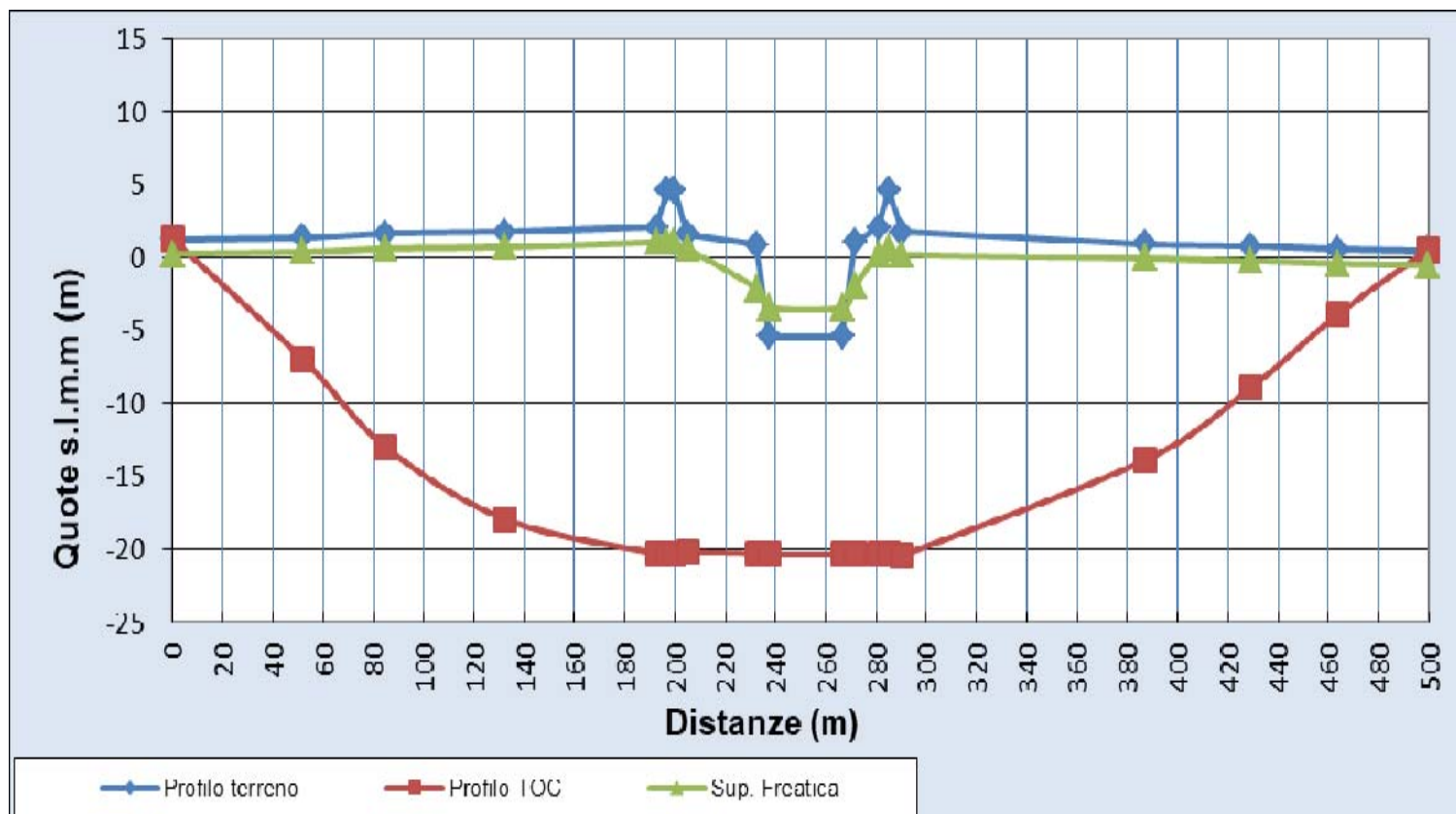


Figura 11 –Sezione schematica del terreno e della T.O.C. (entrata della trivellazione a sinistra)

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

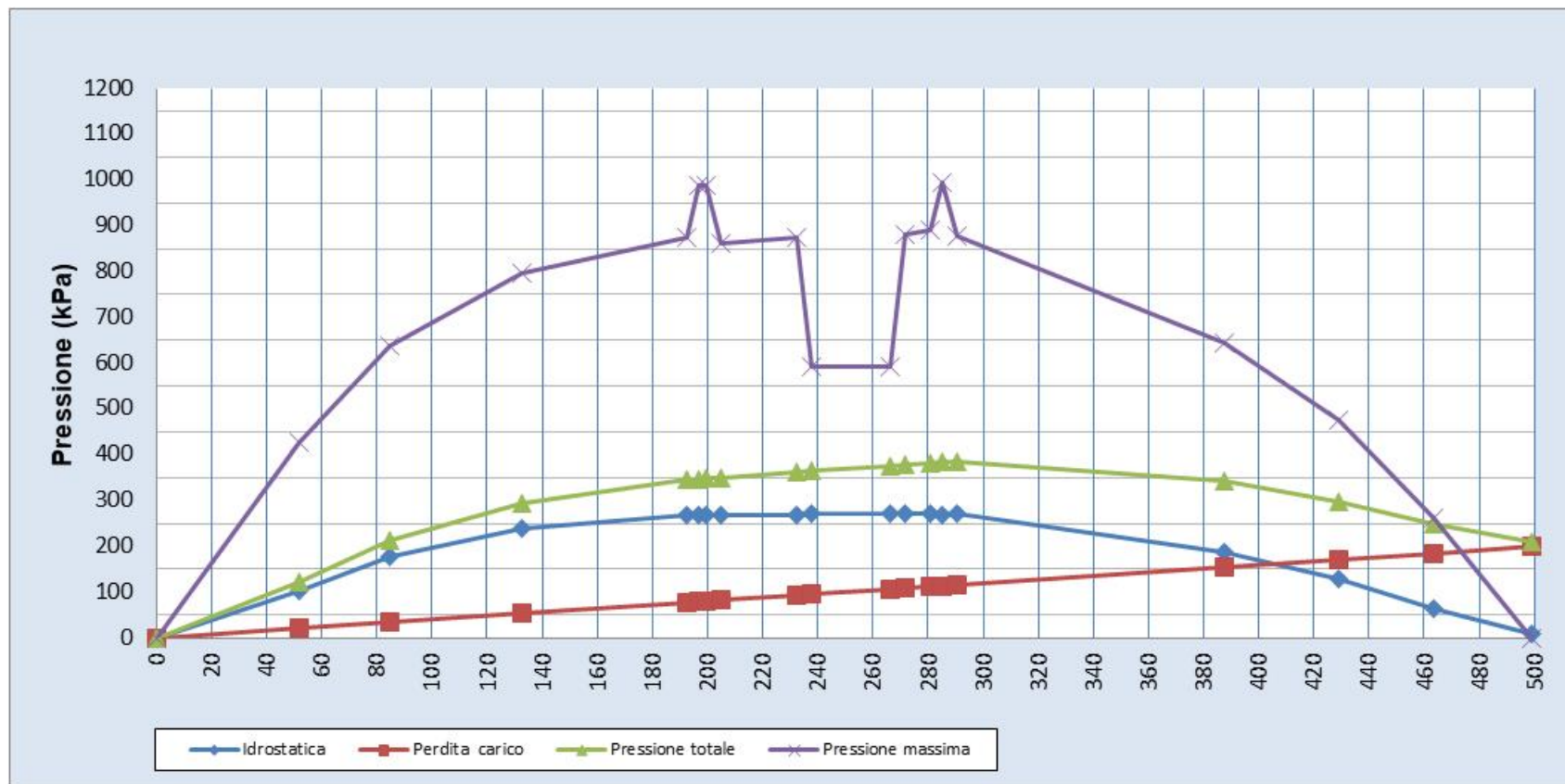


Figura 12 - Andamento della pressione operativa e della resistenza del terreno in funzione della distanza dall'entrata

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Station	Ground level (m)	Water table depth (m)	Pipe level (m)	Pipe Soil Cover (m)	c' (kPa)	Ø (°)	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	σ'_{of} (kPa)	Ro(m)	R _{pmax} (m)	P _{lim} (kPa)	P _{max blow out} (kPa)
0	1.3	1.0	1.3	0.0	0	28	17000	0.33	19.0	0	0.00	0.00	0	0
52	1.4	1.0	-7.0	8.4	0	28	17000	0.33	19.0	54	5.57	0.71	392	427
85	1.6	1.0	-13.0	14.6	0	28	17000	0.33	19.0	89	9.73	0.56	555	638
133	1.7	1.0	-17.9	19.7	0	28	17000	0.33	19.0	118	13.11	0.48	674	797
193	2.1	1.0	-20.2	22.3	0	28	17000	0.33	19.0	132	14.87	0.46	732	876
197	4.7	3.6	-20.2	24.9	0	28	17000	0.33	19.0	166	16.61	0.41	858	989
200	4.7	3.6	-20.2	24.9	0	28	17000	0.33	19.0	166	16.61	0.41	858	989
205	1.6	1.0	-20.2	21.8	0	28	17000	0.33	19.0	130	14.53	0.46	721	861
232	0.9	3.0	-20.3	21.2	0	28	17000	0.33	19.0	141	14.13	0.44	764	873
238	-5.4	-2.0	-20.3	15.0	0	28	17000	0.33	19.0	69	9.97	0.63	464	591
267	-5.4	-2.0	-20.3	15.0	0	28	17000	0.33	19.0	69	9.97	0.63	464	591
272	1.1	3.0	-20.3	21.4	0	28	17000	0.33	19.0	142	14.27	0.44	769	880
281	2.1	1.8	-20.3	22.4	0	28	17000	0.33	19.0	139	14.93	0.45	756	891
285	4.6	4.0	-20.3	24.9	0	28	17000	0.33	19.0	169	16.61	0.40	868	995
290	1.7	1.5	-20.4	22.1	0	28	17000	0.33	19.0	135	14.73	0.45	741	877
387	1.0	1.0	-13.8	14.8	0	28	17000	0.33	19.0	90	9.87	0.55	560	645
429	0.8	1.0	-8.9	9.7	0	28	17000	0.33	19.0	62	6.47	0.67	429	475
464	0.6	1.0	-3.9	4.5	0	28	17000	0.33	19.0	33	3.00	0.92	274	260
499	0.5	1.0	0.5	0.0	0	28	17000	0.33	19.0	0	0.00	#####	#DIV/0!	#DIV/0!

Tabella 3 -. Risultati del calcolo della pressione dei fanghi

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Dati di input	
Angolo di uscita	9 °
Raggio della catenaria	200 m
Distanza fra i rulli	15 m
Profondità del pozzetto	1.5 m
Altezza dei rulli	0.5 m
Caratteristiche della condotta:	
Diametro esterno	324 mm
Spessore di parete	7.04 mm
SMYS (Rp)	360 N/mm ²
Profilo della catenaria di varo	
Altezza massima H _{max}	0.96 m
Distanza alla H _{max}	19.60 m
Altezza del punto di svolta	0.73 m
Dist. al punto di svolta	29.21 m
Angolo punto di svolta	-2.76 °
Lunghezza totale	38.82 m
Lunghezza pozzetto	11.69 m

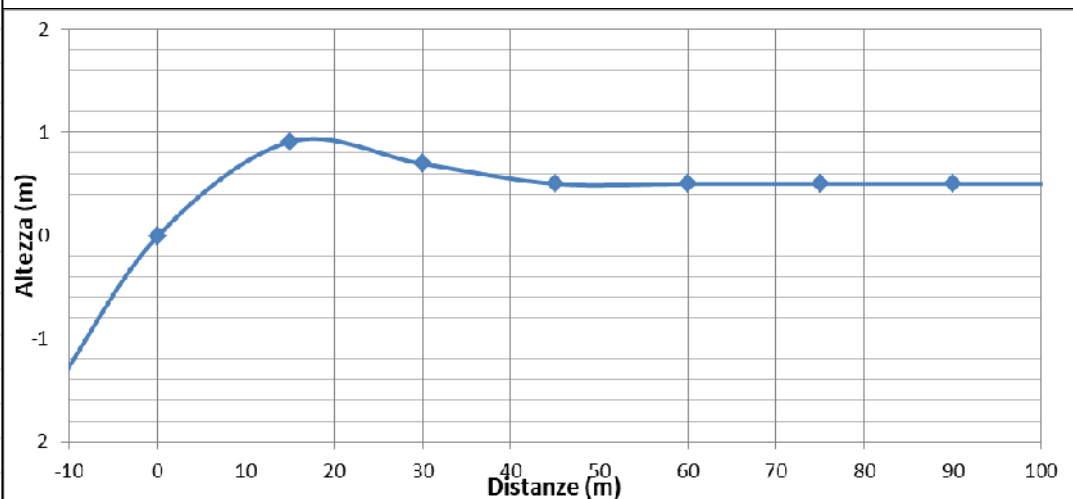


Figura 13 – Calcolo e grafico della curva di varo per angolo di uscita 9°, raggio 420 m. Altezza max. = 0.96 m

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

8 VERIFICA AL SIFONAMENTO

8.1 Generalità

La trivellazione, attraversando il corso d'acqua dei Fiumi Uniti, sottopassa anche i relativi rilevati arginali. Il cavo lungo il quale viene messa in posto la tubazione potrebbe rappresentare una via di preferenziale filtrazione delle acque e, a seguito di elevati battenti idrici in fase di piena, si potrebbero instaurare fenomeni di sifonamento al piede dell' argine.

Tale eventualità non si verifica durante i lavori di trivellazione, se eseguiti in periodi di magra, quando non si hanno battenti idrici al di sopra del piano campagna. Si fa comunque presente che in fase di esecuzione dei lavori nel cavo viene mantenuto con una elevata pressione il fango di trivellazione, il quale ha una permeabilità praticamente nulla, e quindi il cavo stesso costituisce una via di difficile filtrazione.

Nel presente capitolo si verifica che la profondità di sottopasso dell'argine sia tale da scongiurare, con adeguato fattore di sicurezza, qualsiasi fenomeno di filtrazione e di sifonamento dovuto alla installazione della condotta con il metodo della TOC, dal momento che il cavo trivellato una volta inserita la tubazione tende a chiudersi nel giro di poco tempo a seguito del cedimento del terreno circostante.

8.2 Metodologia

Per la verifica al sifonamento si sono usati due differenti metodi, riconducibili all'analisi del gradiente idraulico dei possibili percorsi di filtrazione lungo il tratto rimaneggiato dalla TOC paragonato con quello critico o con quello reale nel corpo arginale esistente adeguatamente ridotto da un coefficiente parziale.

I metodi utilizzati sono i seguenti:

- Metodo del gradiente
- Metodo di Lane
- Metodo olandese

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

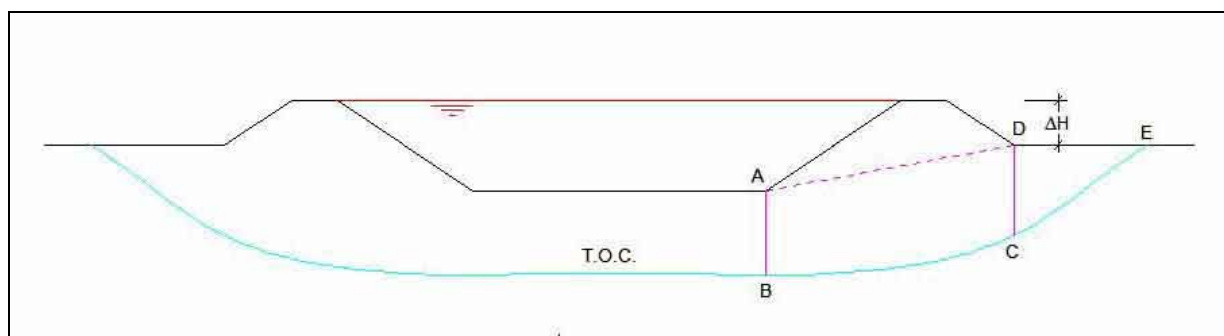


Figura 14- Sezione trasversale teorica

(per precauzione si assume che il franco idrico sia nullo)

8.2.1 Metodo del gradiente

L'azione viscosa dell'acqua provoca un trasferimento di energia fra l'acqua e il terreno: fra due punti distanti Δs lungo una linea di corrente infatti si ha una perdita di carico Δh . La forza corrispondente si chiama forza di filtrazione: al suo aumentare al di sopra di un certo valore può provocare il fenomeno del sifonamento che consiste nell'asportazione di granuli di terreno e il conseguente sempre più veloce moto di filtrazione fino al formarsi di veri e propri canali di flusso.

La velocità limite del moto di filtrazione al di sopra della quale si inizia ad avere asportazione di particelle di terreno corrisponde ad un cosiddetto gradiente critico i_{cr} dato da:

$$i_{cr} = (\gamma_s - \gamma_w) / \gamma_w = \gamma' / \gamma_w$$

dove:

γ_s = peso specifico dei granuli

γ_w = peso specifico dell'acqua

γ' = peso specifico sommerso dei granuli

Il gradiente idraulico che determinerebbe il moto di filtrazione lungo il percorso di trivellazione è funzione della sua lunghezza L (minimo percorso tra ABCE e ABCD, v. Fig. 14) e della perdita di carico Δh , cioè il dislivello tra livello di massima piena prevista e piede dell'argine secondo la relazione:

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

$$i = \Delta h / L$$

Il fattore di sicurezza nei confronti del sifonamento risulta pertanto:

$$Fs = i_{cr} / i = i_{cr} \cdot L / \Delta h$$

Il metodo non tiene conto di differenziazioni tra percorsi orizzontali e percorsi verticali; nel calcolo, per tenere in conto il disturbo provocato dalla trivellazione lungo il tratto orizzontale, si considera un valore del peso di volume medio tra il peso del terreno indisturbato in posto e il peso di volume dei fanghi di perforazione (presenti lungo il percorso orizzontale trivellato). In tal modo si tiene conto della situazione peggiore che si ha quando il terreno intorno al foro non ha ancora avuto modo di consolidarsi del tutto.

In accordo con le nuove NTC 2018 (6.2.4.2 *Verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici*) si ritiene soddisfatta la verifica quando si ottiene un $Fs \geq 3$ (v. stralcio NTC in Fig. 15).

nel caso di frontiera di efflusso libera, la verifica a sifonamento si esegue controllando che il gradiente idraulico i risulti non superiore al gradiente idraulico critico i_{cr} diviso per un coefficiente parziale $\gamma_R = 3$, se si assume come effetto delle azioni il gradiente idraulico medio, e per un coefficiente parziale $\gamma_R = 2$ nel caso in cui si consideri il gradiente idraulico di efflusso;

Figura 15 - Stralcio delle NTC 2018 - 6.2.4.2

8.2.2 Criterio di Lane

Dall'osservazione sperimentale di una numerosa casistica, Lane (1935) verificò che i percorsi sub-orizzontali H (con inclinazione inferiore a 45°) offrono una resistenza dell'ordine di 1/3 rispetto a quella dei percorsi sub-verticali V. Conseguentemente il coefficiente di sicurezza medio ponderale è data da:

$$Fs = (1/3 H + V) / \Delta h$$

I valori di Fs minimi raccomandati da Lane sono funzione del tipo di terreno, in accordo con la tabella 13 di seguito rappresentata.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

MATERIALE	Fs
Sabbia fine o limo	8.5 ÷ 7
Sabbia media	6
Sabbia grossolana	5
Ghiaia fine	4
Ghiaia media	3.5
Ghiaia grossolana	3
Argilla tenera	2
Argilla dura	1.6 ÷ 1.8

Tabella 13 - Valori del coefficiente di Lane per diversi tipi di terreno (Lane 1935)

Nei calcoli si è considerato il percorso più breve tra ABCD (AB e CD verticali, BC orizzontale) e il percorso ABCE (AB verticale, BCE orizzontale).

Con questo metodo non è possibile introdurre i coefficienti correttivi previsti dalle NTC 2008. L'effetto turbativo dovuto dalla presenza della perforazione nel tratto orizzontale viene tenuto in conto dal fattore riduttivo di 1/3 da applicarsi ai percorsi di filtrazione nella direzione orizzontale.

8.2.3 Metodo olandese

Il metodo olandese (NEN 3050-3051 Provincie di Zuid, Holland, 1985) rappresenta il confronto tra la lunghezza totale del percorso di filtrazione a seguito della trivellazione e quello più breve ipotizzabile nel corpo arginale nella situazione preesistente alla TOC.

La lunghezza del percorso L a lavori eseguiti è stata assunta come il minimo tra i percorsi ABCD e ABCE, tenendo in conto la differenziazione tra percorso orizzontale (penalizzato di un fattore 1/3) e percorso verticale. Il percorso di filtrazione nell'ambito del rilevato arginale L_{arg} viene stimato, per cautela, come il più lungo, cioè quello corrispondente al tratto congiungente il piede interno con quello esterno (tratto AE).

Il fattore di sicurezza indica quanto più lungo è il tragitto dell'acqua di filtrazione lungo la zona interessata dal passaggio della TOC (ABCD o ABCE) rispetto al percorso più sfavorevole nel corpo arginale nelle condizioni antecedenti la trivellazione (AE) ($FS = L / L_{arg}$).

Per ulteriore cautela, al fine di tenere conto anche dell'eventuale scadimento delle proprietà dei terreni lungo la zona trivellata, il tratto orizzontale viene ulteriormente penalizzato di un

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

fattore 2, così da portare ad 1/6 il peso della sua lunghezza di filtrazione, mentre il percorso nel rilevato arginale viene penalizzato solo di un fattore 3.

L'effetto turbativo dovuto dalla presenza della perforazione nel tratto orizzontale viene tenuto in conto dal fattore riduttivo di 1/6 da applicarsi ai percorsi di filtrazione nella direzione orizzontale.

La verifica si ritiene soddisfatta se risulta $F_s = (AB + 1/6BC + CD) / (AD/3) > 1$.

8.3 Risultati

La verifica ha riguardato entrambi gli argini dei Fiumi Uniti nella sezione di attraversamento. Per quanto riguarda i battenti idrici, non è stato tenuto in conto il franco idrico e quindi i livelli sono stati assunti a quota sommità della sponda sinistra che risulta a quota più bassa della sommità arginale di destra.

Per la verifica con il metodo del gradiente si è tenuto in conto quanto previsto dalle NTC 2018.

Per la verifica con il metodo olandese si è usata la penalizzazione di 1/6 sui percorsi orizzontali della filtrazione lungo la zona trivellata.

Pur introducendo tali cautele, i risultati dei calcoli di filtrazione hanno mostrato fattori di sicurezza sempre altamente soddisfacenti con tutti i metodi adottati.

Essi nel seguito vengono riassunti per le due tipologie di verifiche eseguite (v. Tab. 4).

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
LSC-211			

CARATTERISTICHE GEOMETRICHE							
CORSO D'ACQUA	ARGINE	PERCORSI IDRICI					BATTENTE
		AB	BC	CD	CE	AD	DH
Fiumi Uniti	Argine destro	22.30	12.10	22.00	∞	12.10	2.84
	Argine sinistro	21.80	12.40	22.30	∞	12.40	2.52
RISULTATI VERIFICHE SIFONAMENTO							
METODO GRADIENTE		CRITERIO LANE			METODO OLANDESE		
$L = ABCD$	$F_s = i_{cr} \cdot L/DH$	$L = AB + 1/3BC + CD$	F_{lane}	$F_s > F_{lane}$	$L = AB + 1/6BC + CD$	$L_{arg} = AD/3$	$F_s = L/L_{arg}$
56.40	16.90	48.33	7.00	17.02	46.32	4.03	11.48
56.50	19.04	48.23	7.00	19.14	46.17	4.13	11.17

Tabella 4 – Caratteristiche geometriche (con riferimento alla Fig. 14) e risultati del calcolo di sifonamento

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

9 CEDIMENTI DEL TERRENO IN FASE DI PERFORAZIONE

9.1 Generalità

Durante la fase di perforazione l'asportazione del terreno e la modificata distribuzione delle tensioni intorno al cavo cilindrico possono indurre dei cedimenti nei terreni sovrastanti ad esso. La distribuzione degli spostamenti verticali, dipendente dalla profondità del cavo e dalla distanza orizzontale, può manifestarsi fino alla superficie, seppur con intensità in genere ridottissime.

9.2 Metodologia

Da studi sperimentali e dalla casistica si evidenzia che la distribuzione degli spostamenti verticali, lungo una sezione trasversale, può essere descritta da una espressione Gaussiana (Viggiani, 1999), di equazione:

$$w = w_{max} \cdot e^{-x^2/2i^2}$$

dove:

- w cedimento generico di un punto posto in superficie
- w_{max} cedimento in corrispondenza della proiezione in superficie dell'asse TOC
- x distanza del punto dalla proiezione in superficie dell'asse TOC
- i ascissa del punto di flesso del profilo di subsidenza; $i = kh$
- k coefficiente pari a 0.5 per terreni coesivi, 0.25 per terreni incoerenti
- h profondità dell'asse delle perforazione

Per il calcolo dell'assestamento verticale massimo w_{max} si fa ricorso alla seguente espressione:

$$w_{max} = 0.31 V' \cdot D^2 / kz_0$$

dove:

- V' coefficiente dipendente dal tipo di terreno
 - = 0.03 per argille tenere
 - = 0.01÷0.02 per argille consistenti
 - = 0.02 per terreni granulari
- D diametro di perforazione.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

9.3 Risultati

Si è effettuata la verifica dei cedimenti verticali lungo l'intera lunghezza della trivellazione e quindi anche in corrispondenza del piede degli argini.

Dai calcoli effettuati si sono ricavate le curve degli spostamenti verticali indotti in superficie a causa della perforazione.

Come si può osservare (Fig. 16) tali spostamenti sono assolutamente trascurabili, quasi assenti, dell'ordine di poche frazioni di millimetro.

Di seguito si riportano i risultati salienti.

- o Profondità foro dal piede del rilevato dx $h = 22 \text{ m}$
- o Profondità foro dal piede del rilevato sin $h = 22.3 \text{ m}$
- o Cedimento verticale argine dx $w_{max} = 0.06 \text{ mm}$
- o Cedimento verticale argine sin $w_{max} = 0.06 \text{ mm}$

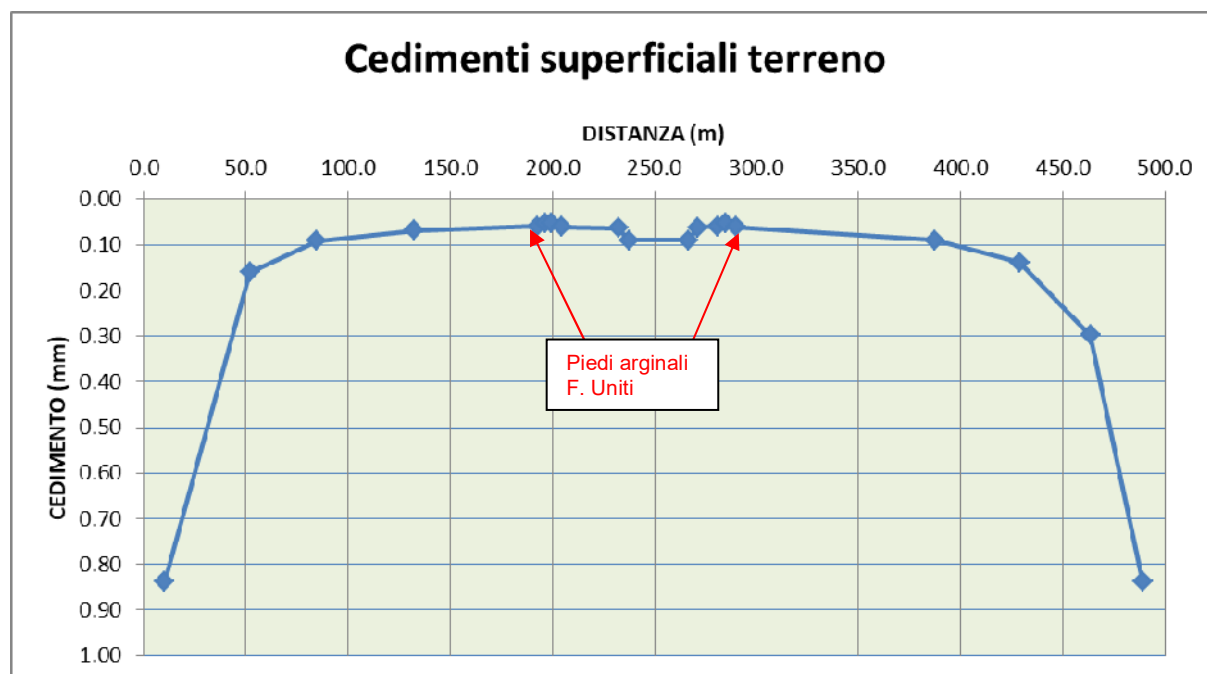


Figura 16 – Andamento dei cedimenti superficiali lungo la perforazione della TOC

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

10 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente studio è stato rivolto alla caratterizzazione geotecnica dei terreni presenti lungo il tracciato della T.O.C. in progetto al fine di verificarne la fattibilità e fornire i parametri necessari per la sua progettazione esecutiva.

Inoltre sono state eseguite specifiche verifiche in merito ad eventuali effetti che la T.O.C., con la configurazione di progetto, potrebbe indurre in superficie in fase di realizzazione, cioè la rottura del terreno e la fuoriuscita dei fanghi.

Dalle indagini geognostiche e geotecniche eseguite è emerso che i terreni presenti risultano facilmente trivellabili, essendo costituiti da materiale sabbioso-limoso-argilloso.

Il profilo attraversa terreno prevalentemente sabbioso-limoso fino a profondità di circa 12 m e più in profondità limo-argilloso.

Sono state inoltre condotte verifiche finalizzate alla valutazione della pressione massima dei fanghi sostenibile dal terreno sovrastante durante la perforazione in paragone con la pressione operativa necessaria per l'avanzamento della trivellazione; questa ultima deve sempre mantenersi inferiore, al fine di evitare qualsiasi fenomeno di fuoriuscita incontrollata in superficie.

In merito al rischio di fuoriuscite incontrollate di fango durante la perforazione, operando adeguatamente in termini di scelta delle idonee attrezzature e delle modalità esecutive, si è verificato che la zona di terreno plasticizzato intorno al foro di trivellazione si mantiene sempre al di sotto del piano campagna per quasi tutta la lunghezza della trivellazione. Solo negli ultimi 35 m circa prima dell'uscita i margini di sicurezza risultano diminuire; tuttavia l'assenza di strutture sensibili o di corsi d'acqua in tale posizione nonché la possibilità di intervenire rapidamente in caso di venuta a giorno di fango riducono notevolmente il rischio di provocare danni.

L'impresa esecutrice, sulla base delle informazioni in merito alla natura del terreno sopra riportate, eventualmente integrate se riterrà opportuno da nuove indagini e verifiche, dovrà pertanto adottare la tecnologia di perforazione più adeguata alla situazione nonché tutti i necessari accorgimenti atti a portare a termine con successo la trivellazione. In particolare si

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

consiglia di massimizzare l'area dell'anello di perforazione (differenza tra l'area della testa e l'area delle aste) usando una testa di perforazione la più larga possibile in modo da minimizzare la perdita di carico della pressione dei fanghi.

Si consiglia inoltre, in corrispondenza del passaggio al di sotto dell'alveo del torrente e nel tratto terminale della TOC, dove i margini di sicurezza in relazione alla venuta a giorno dei fanghi risultano necessariamente inferiori che altrove, di procedere con bassa velocità di avanzamento assicurando la massima pervietà del cavo.

In merito alla verifica di sifonamento degli argini, l'elevata profondità (di 22 m sotto di entrambi i piedi) alla quale è impostata la trivellazione orizzontale controllata fa sì che non esista rischio alcuno che si verifichi il fenomeno. Le verifiche condotte con metodi diversi, anche in accordo con la NTC 2018, hanno infatti evidenziato fattori di sicurezza nei confronti del sifonamento assai elevati.

Per quanto riguarda il cedimento indotto dalla cavità trivellata al di sotto dell'argine, è risultato che i cedimenti verticali indotti dal passaggio della perforazione a livello del piano campagna sono impercettibili, praticamente nulli.

Si conclude affermando che la T.O.C. in progetto risulta assolutamente fattibile per quanto riguarda gli aspetti considerati.

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

ALLEGATO 1

INDAGINI GEOGNOSTICHE

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

SONDAGGIO GEOGNOSTICO A CAROTAGGIO CONTINUO SG1

LEGENDA

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Ø mm	R v	A z	Pz	metri ben	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	SPT S.P.T.	RQD % N 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

1) Diametro del foro / Tipo di carotiere

2) Rivestimento

3) Profondità dell'acqua (rinvenimento e stabilizzazione)

4) Piezometri

5) Scala metrica con limiti delle battute (>)

6) Simbolo litologico

7) Campioni (numero, tipo, profondità testa e scarpa)

8) Resistenza alla punta (kg/cm²)

9) Vane test (kg/cm²)

10) Percentuale di prelievo (1-10, 11-20, ..., 91-100 %)

11) Prova S.P.T.

12) Valore di N_{spt}

13) Percentuale R.Q.D. (1-10, 11-20, ..., 91-100 %)

14) Profondità della base dello strato (m)

15) Descrizione della litologia dello strato

Tubo aperto

tubo cieco

finestrato

Casagrande

tubo cieco

cella drenaggio

cementazione

She = Shelby

Den = Denison

Ost = Osterberg

Maz = Mazier

Crp = Craps

nk3 = NK3

Ind = Indisturbato

Dis = Disturbato

SDi = Semi disturbato

SPT = SPT

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
	 consulenza materiali - ispezioni - saldatura progettazione - direzione lavori	NR/17135	20088
		LSC-211	

Committente: SNAM RETE GAS	Sondaggio: SG 1
Riferimento: RAVENNA MET. DN 26	Data: 06/10/2017
Coordinate: N 44.39181° E 12.28606°	Quota:
Perforazione: CAROTAGGIO CONTINUO	

SCALA 1:125				STRATIGRAFIA - SG 1										Pagina 1/1	
Ø mm	R v	A r	Pz	metri batt.	LITOLOGIA	Campioni	RP	VT	Prel. % 0 --- 100	S.P.T. S.P.T.	N	RQD % 0 --- 100	prof. m	DESCRIZIONE	
				1		1) Rim < 0,50 1,00							0,5	SUOLO LIMOSO MARRONE CHIARO. LIMO DEBOLMENTE SABBIOSO FINE, MARRONE.	
				2		2) Rim < 1,50 2,00							2,0	SABBIA MARRONE-NOCCIOLA, SCIOLTA, DEBOLMENTE LIMOSA SCARSAMENTE ADDENSATA.	
				3											
				4						3-4-4	8		4,4	SABBIA GRIGIA, MEDIA, DEBOLMENTE LIMOSA, GRANULOMETRIA PIU' FINE CON LA PROFONDITA', MODERATMENTE ADDENSATA.	
				5											
				6											
				7											
				8											
				9		3) Dis < 8,50 9,00				5-7-8	15				
				10											
				11											
				12		4) Rim < 12,00 12,50	1.5						12,0	ARGILLA GRIGIA PLASTICA CON PUNTI NERI, MODERATAMENTE CONSISTENTE.	
				13			1.8						12,6		
				14		5) Dis < 13,50 14,00	0.8							LIMO GRIGIO CON SABBIA FINE, POCO CONSISTENTE.	
				15			0.5			5-9-9	18				
				16			0.4								
				17			0.8								
				18			0.8								
				19			0.5						18,0	LIMO CON SABBIA ED ARGILLA COLOR GRIGIO, POCO CONSISTENTE.	
				20			0.7						19,5		
				21		6) Dis < 20,00 20,50	0.4						20,0	LIVELLO SABBIOSO DEBOLMENTE LIMOSO ADDENSATO.	
				22			0.5							LIMO GRIGIO CON SABBIA ED ARGILLA STRATIFICATI, POCO CONSISTENTE.	
				23			0.5								
				24			0.4								
101				25		7) Rim < 24,50 25,00	0.5						25,0		

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COMMESSA	C.T.
		NR/17135	20088
		LSC-211	

**GRAFICI E INTERPRETAZIONI PROVA PENETROMETRICA
STATICA CONTINUA CPTU n. 1**

