

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITA 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 1 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

Progetto: 21/10/2022, 1096380.E

EMERGENZA GAS
INCREMENTO DI CAPACITÀ DI RIGASSIFICAZIONE
 (DL 17.05.2022, N. 50)
FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI

**Met. Collegamento PDE FSRU Ravenna al Nodo di Ravenna
 DN 900 (36") DP 75 bar**

ATTRAVERSAMENTO:

**S.P. N. 97 (Via Canala)
 Progr. Km 9+952**

Comune di Ravenna (RA)

RELAZIONE TECNICA



0	Emissione per Permessi	E.Camerini	A.Gigliotti	M.Begini	20/09/2022
Rev.	Descrizione	Elaborato	Verificato	Approvato	Data

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 2 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

INDICE

1	GENERALITÀ.....	3
1.1	SCOPO.....	3
1.2	ELABORATI DI RIFERIMENTO	3
1.3	DEFINIZIONI	3
1.4	NORMATIVA DI RIFERIMENTO.....	4
2	CARATTERISTICHE DEI MATERIALI.....	5
2.1	CARATTERISTICHE GEOMETRICHE	5
2.2	CARATTERISTICHE MECCANICHE	6
3	CALCOLO DELLO SPESSORE DEL TUBO DI LINEA DN 900 (36").....	7
4	DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEL TUBO DI LINEA.....	9
4.1	PARAMETRI GEOTECNICI.....	9
4.2	ANALISI DEI CARICHI SUL TUBO DI LINEA.....	10
4.2.1	<i>Carico geostatico.....</i>	<i>10</i>
4.2.2	<i>Carico idrostatico</i>	<i>12</i>
4.2.3	<i>Carico variabile dovuto al traffico</i>	<i>13</i>
4.2.4	<i>Peso proprio della condotta.....</i>	<i>17</i>
4.3	CALCOLO DELLE DEFORMAZIONI E VERIFICA ALL'OVALIZZAZIONE	17
4.4	CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI E VERIFICA DELLA RESISTENZA DEL TUBO DI LINEA	19
4.5	VERIFICA AL BUCKLING	22
5	CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE CONDOTTE IN OPERA	25
5.1	TUBO DI LINEA DN 900 (36")	25
5.2	PROTEZIONE CATODICA	25
5.3	POLIFORA PORTACAVI E TELECONTROLLO	25
6	GEOMETRIA E MODALITÀ ESECUTIVE.....	26
6.1	GEOMETRIA DELL'ATTRAVERSAMENTO	26
6.2	TELECONTROLLO/TELECOMANDO	26
6.3	MODALITÀ ESECUTIVE DELLA POSA DEL METANODOTTO IN PROGETTO	26
6.3.1	<i>Descrizione generale metodologia T.O.C.</i>	<i>26</i>
7	DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA	31
8	CONCLUSIONI.....	33

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 3 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

1 GENERALITÀ

1.1 Scopo

Nella presente relazione sono illustrate le caratteristiche dei materiali e le modalità esecutive dell'attraversamento con tecnica T.O.C. della S.P. N. 97 previsto alla progressiva chilometrica 9+952 da parte del metanodotto in progetto "FSRU Ravenna e Collegamento alla Rete Nazionale Gasdotti".

L'attraversamento è situato nel territorio comunale di Ravenna inquadrato nel foglio 66 mappali 110, 130, 115, 1 e foglio 37 mappali 96, 97 e 98 dell'U.T.E. (Ufficio Tecnico Erariale-Catasto).

La posa verrà realizzata mediante Trivellazione Orizzontale Controllata (T.O.C.).

Contestualmente alla posa della condotta, sarà posta in opera una polifora portacavi, mediante trivellazione orizzontale controllata separata, ad una distanza compresa tra i 6 ed 8 m dal metanodotto in progetto.

1.2 Elaborati di riferimento

- DIS-AT-5C-37285 Attraversamento in T.O.C. Canale Canala e S.P. N. 97 Prog. Km 9+952

1.3 Definizioni

Condotte di 1° specie: condotte con pressione massima di esercizio superiore a 24 bar;

Profondità di interrimento: distanza compresa tra la generatrice superiore del tubo e la superficie del terreno (piano campagna);

Diametro nominale (DN): unità di misura convenzionale in mm, che definisce la sezione della tubazione e degli apparati;

Pressione massima di esercizio (MOP): massima pressione relativa alla quale un sistema può essere fatto funzionare in modo continuo nelle condizioni di normale esercizio;

Pressione di progetto (DP): pressione relativa alla quale si riferiscono i calcoli di progetto. La pressione di progetto (DP) deve essere uguale o superiore alla pressione massima di esercizio (MOP) prevista.

Tecnica "T.O.C." (o "H.D.D."): Trivellazione Orizzontale Controllata (Horizontal Directional Drilling) è una tecnologia trenchless finalizzata alla posa della tubazione interrata senza necessità di esecuzione di scavo a cielo aperto.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 4 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

1.4 Normativa di Riferimento

Per la progettazione del tratto a terra sono state prese in considerazione le norme e disposizioni di legge vigenti, costituite dalle seguenti normative:

- *D.M. 17.04.2008* del Ministero dello Sviluppo Economico – Regola Tecnica per la progettazione, costruzione, collaudo, esercizio e sorveglianza delle opere e degli impianti di trasporto di gas naturale con densità non superiore a 0,8.
- *D.M. 17.01.2018*: Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.
- CSLLP Circolare 21/01/2019, n. 7 “Circolare Applicativa - Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle "Norme tecniche per le costruzioni"» di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.”
- Decreto Legge 25 Giugno 2003, n. 233: “Attuazione della direttiva 1999/92/CE relativa alle prescrizioni minime per il miglioramento della tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori esposti al rischio di atmosfere esplosive”
- *D.L. 9 Aprile 2008, n. 81*: “Attuazione dell'articolo 1 della legge 3 agosto 2007, n. 123, in materia di tutela della salute e della sicurezza nei luoghi di lavoro”
- Decreto del Presidente della Repubblica 23 Marzo 1998, n. 126: “Norme per l'attuazione della direttiva 94/9/CE in materia di apparecchi e sistemi di protezione destinati ad essere utilizzati in atmosfera potenzialmente esplosiva”
- *D.L. 25 Febbraio 2000*: “Attuazione della direttiva 97/23/CE in materia di attrezzature a pressione”
- *Decreto Legislativo 30 Aprile 1992, n. 285*: “Nuovo Codice della Strada”.
- *Specifiche Snam Rete Gas e documentazione contrattuale.*
- Norme CEI / UNI / EN.

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 5 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

L'attraversamento verrà realizzato mediante Trivellazione Orizzontale Controllata, più brevemente definita T.O.C. con la posa di un tubo di linea DN 900 (36") a spessore maggiorato ($t=14.2\text{mm}$).

La tubazione è costituita da acciaio di qualità aventi le caratteristiche meccaniche e chimiche rispondenti a quanto richiesto dal D.M.17/04/2008.

Di seguito vengono riportate le caratteristiche geometriche e meccaniche della condotta oggetto dell'attraversamento.

2.1 Caratteristiche geometriche

a. Tubo di linea a spessore maggiorato DN 900 (36')

diametro esterno	D_e	=	916.4 mm
spessore	t	=	14.2 mm
diametro interno	D_i	=	888.00 mm
peso per unità di lunghezza	p	=	315.92 kg/m

b. Tubo portacavi DN 200 (8")

diametro esterno	D_e	=	219.10 mm
spessore	t	=	7.00 mm
diametro interno	D_i	=	205.1 mm
peso per unità di lunghezza	p	=	36.61 kg/m

c. Trivellazione orizzontale controllata (T.O.C.)

lunghezza trivellazione	L	=	437.62 m
distanza orizzontale	L_1	=	346.35 m
profondità minima rispetto al piano viabile	H_1	=	16.50 m

- Primo tratto rettilineo (senso gas)

angolo di uscita	α	=	5° 37'
lunghezza	L	=	80.20 m
distanza orizzontale	L_1	=	79.82 m

- Tratto curvilineo

lunghezza (sviluppo)	L	=	235.22 m
lunghezza orizzontale	L_1	=	234.57 m
raggio	R	=	1000.00 m

- Secondo tratto rettilineo (senso gas)

Angolo di ingresso	α	=	7° 51'
lunghezza	L	=	32.20 mm
distanza orizzontale	L_1	=	31.96 mm

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 6 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

2.2 Caratteristiche meccaniche

a. Tubo di linea a spessore maggiorato DN 900 (36")

tipo di acciaio

L450 NB/MB

carico unitario di snervamento minimo garantito

$R_{t0.5} = 450 \text{ Mpa}$

b. Tubo portacavi DN 200 (8")

tipo di acciaio

L360 NB/MB

carico unitario di snervamento minimo garantito

$R_{t0.5} = 360 \text{ MPa}$

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 7 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

3 CALCOLO DELLO SPESSORE DEL TUBO DI LINEA DN 900 (36")

In riferimento al *DM 17/04/08*, lo spessore nominale del tubo di linea minimo t_{min} , al netto delle tolleranze negative di fabbricazione, deve risultare non inferiore al valore determinato con la seguente espressione:

$$t \geq t_{min} [mm] = \frac{(DP \times D)}{(20 \times s_p)}$$

con:

- D : diametro esterno della condotta in mm;
- DP : pressione di progetto;
- s_p : sollecitazione circonferenziale ammissibile [MPa] $\leq f \times R_{t0.5}$;
- f : grado di utilizzazione;
- $R_{t0.5}$: carico unitario di snervamento minimo garantito;

Secondo il *DM 17/04/08* le condotte per il trasporto di gas naturale si classificano in funzione della MOP, pressione massima di esercizio:

- 1^a specie con $MOP > 24$ bar;
- 2^a specie con $12 < MOP \leq 24$ bar;
- 3^a specie con $5 < MOP \leq 12$ bar;
- 4^a specie con $1.5 < MOP \leq 5$ bar;
- 5^a specie con $0.5 < MOP \leq 1.5$ bar;
- 6^a specie con $0.04 < MOP \leq 0.5$ bar;
- 7^a specie con $MOP \leq 0.04$ bar.

Il metanodotto in oggetto ha una pressione DP pari a 75 bar, pertanto si classifica di 1^a specie e si definisce il grado di utilizzazione f per le tubazioni di linea pari a **0.72** massimo utilizzabile (*punto 2.1 DM 17/04/08*).

Deve comunque essere garantito uno spessore minimo t_{min2} , come specificato nel punto 2.1 del *DM 17/04/08*, pari a:

- 1,8 mm per diametri esterni fino a 30 mm;
- 2,3 mm per diametri esterni oltre 30 mm e fino a 65 mm;
- 2,6 mm per diametri esterni oltre 65 mm e fino a 160 mm;
- 3,5 mm per diametri esterni oltre 160 mm e fino a 325 mm;
- 4,5 mm per diametri esterni oltre 325 mm e fino a 450 mm;
- 1% del diametro esterno per diametri esterni oltre i 450 mm.

Il metanodotto in progetto prevede l'utilizzo di una condotta DN 900, quindi si considera $t_{min2} = 1\% \text{ DN } 9,16 \text{ mm}$, come minimo di legge.

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 8 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

Sempre per condotte di 1° specie, nel caso in cui non siano rispettate le condizioni elencate nel *punto 2.5 del DM 17/04/08*, lo spessore minimo deve essere calcolato aumentando del 25% la pressione di progetto, come indicato nella seguente formula:

$$t \geq t_{\min 1} [\text{mm}] = \frac{(1.25 \times DP \times D)}{(20 \times s_p)}$$

Il valore utilizzabile per lo spessore della condotta deve essere maggiore del massimo, tra lo spessore minimo di legge ($t_{\min 2}$), e quello calcolato ($t_{\min 1}$).

A seguire si riportano in *Tabella 1* e *2* i risultati dei calcoli sopra esposti per il caso in oggetto congiuntamente con la verifica dello spessore selezionato.

VERIFICA SPESSORE DI LINEA DELLA CONDOTTA SECONDO IL D.M. 17/04/2008								
DN [mm]	D [mm]	DP [bar]	R _{t0.5} [Mpa]	f	sp [MPa]	t _{min1} [mm]	t _{min2} [mm]	t [mm]
900	916.4	75.0	450.0	0.72	324	10.61	9.16	14.2
t > t_{min} VERIFICATO								

Tabella 1. Verifica dello spessore normale di linea secondo il D.M. 17/04/2008 (fattore di utilizzazione f=0.72)

VERIFICA SPESSORE DI LINEA DELLA CONDOTTA SECONDO IL D.M. 17/04/2008								
DN [mm]	D [mm]	DP [bar]	R _{t0.5} [Mpa]	f	sp [MPa]	t _{min1} [mm]	t _{min2} [mm]	t [mm]
900	916.4	75.0	450.0	0.57	256.5	13.40	9.16	14.2
t > t_{min} VERIFICATO								

Tabella 2. Verifica dello spessore di linea con un incremento del 25% della pressione di progetto secondo il D.M. 17/04/2008 attraverso l'uso del fattore di utilizzazione adottato fm=0.57 (GASD C.04.01.00)

Essendo che il valore utilizzato per la condotta in progetto (DN 900 (36") con s= 14.2 mm) è nettamente superiore a quello minimo di legge (s=13.40 mm), la verifica allo spessore, **risulta ampiamente soddisfatta.**

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 9 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

4 DIMENSIONAMENTO E VERIFICA DEL TUBO DI LINEA

In riferimento a quanto previsto al punto 2.7 del DM 17/04/08, il tubo di linea deve essere dimensionato in relazione ai carichi esterni agenti (diametro, spessore, tipo di acciaio) in modo che risultino verificate le massime sollecitazioni cui è soggetto durante le fasi di messa in opera a tubo vuoto non in pressione, ritenuta la condizione più cautelativa. Sono determinate le condizioni tenso-deformative del tubo di linea in relazione alla profondità di posa e al massimo carico mobile transitante.

4.1 Parametri geotecnici

Per la definizione dei parametri geotecnici si fa riferimento alla campagna di sondaggi svolti nel 2017 per conto Snam Rete Gas (rif. relaz. Comis LSC-202-1).

L'analisi bibliografica, le indagini eseguite, unitamente alle osservazioni di superficie fatte con il rilevamento geologico hanno consentito la ricostruzione della stratigrafia del sito e sono state desunte le caratteristiche geotecniche dei terreni di fondazione.

Per le caratteristiche litologiche del sottosuolo in corrispondenza della TOC della S.P. N. 97 e dell'adiacente scolo consorziale "Canala" si considera il sondaggio geognostico più vicino (nominato SG7), spinto fino alla profondità di 25 m. Le indagini hanno evidenziato la presenza di terreni argillosi debolmente limosi fino alla profondità di 4.40m, sabbia limosa moderatamente addensata fino a 5.50m, ghiaia piccola con ghiaietto ben arrotondata con scarsa matrice sabbiosa fino a 8.00 m, sabbia poco addensata con livelli debolmente limosi poco consistenti fino a 17.00 m e terreni costituiti da sabbia fine debolmente limosa moderatamente addensata fino alla profondità di circa 24.5 m.

Gli elementi di conoscenza ricavati dall'esame comparato con l'indagine eseguita e con la bibliografia esistente, risultano più che sufficienti per giungere alla caratterizzazione geotecnica dei terreni.

Nella fattispecie, l'attraversamento in T.O.C. della S.P. 97 avviene ad una profondità minima di 16.50 m riferito al piano strada e correlando i dati ottenuti dai sondaggi geognostici, la trivellazione orizzontale controllata intercetta sedimenti fini costituiti da sabbia fine grigia, poco addensata, con livelli debolmente limosi poco consistenti.

I parametri per la zona interessata dall'attraversamento desunti dalle indagini sono quindi:

γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	Φ [°]
15.4	19.8	33

Tabella 3. Riassunto dei parametri geotecnici.

Al termine delle operazioni di sondaggio è stato misurato il livello della falda che risulta essere presente ad una profondità di circa 1.40 metri dal piano campagna, tuttavia vista anche la presenza di fossi laterali si assume cautelativamente la falda a livello campagna.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 10 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

4.2 Analisi dei carichi sul tubo di linea

Il tubo di linea (vuoto e non in pressione) è dimensionato in base ai carichi a cui sarà sottoposto durante le fasi di messa in opera:

- carico geostatico dovuto al terreno sovrastante il tubo;
- carico idrostatico (in presenza di falda);
- carico variabile da traffico veicolare sulla superficie stradale;
- peso proprio della tubazione.

4.2.1 Carico geostatico

La posa in opera a cielo aperto di una condotta può avvenire in trincea stretta, trincea larga o terrapieno in funzione che siano soddisfatte o meno le seguenti condizioni:

- Trincea stretta: $Lt \leq 3D$ e $Lt > H/2$;
- Trincea larga: $3D < Lt < 10D$ e $Lt < H/2$;
- Trincea infinita (terrapieno): $B \geq 10D$ e $Lt \geq H/2$

con:

- D : diametro esterno del tubo di linea in mm;
- H : profondità di interramento della condotta misurata a partire dalla generatrice superiore del tubo;
- Lt : larghezza della trincea alla profondità H .

Tuttavia, in condizione esecutiva di posa in opera mediante T.O.C., per determinare l'entità e la distribuzione delle azioni effettivamente agenti sul tubo di linea, alla profondità di posa prevista in progetto, occorre distinguere gli effetti dei carichi permanenti indotti dal peso del terreno da quelli indotti dai carichi variabili. Nei limiti delle condizioni di affidabilità delle condizioni di verifica, si ritiene di poter procedere alle necessarie valutazioni secondo schemi semplificati e prudenziali.

Per quanto attiene agli effetti gravitativi indotti dal terreno, la condizione esecutiva di posa in opera mediante T.O.C. si ritiene possa dar luogo all'effetto arco, senza instabilizzazione della colonna verticale direttamente sovrastante il tubo di linea. Ne segue che il carico reale sopportato dal tubo è minore di quello geostatico.

La letteratura specializzata offre diversi metodi per la determinazione del carico agente sulla corona di un cavo rivestito posto a diverse profondità, in relazione alle caratteristiche del terreno.

Facendo riferimento alla teoria di Marston-Spangler¹, adattata al caso, si determinano le modalità di calcolo attinenti alla condizione in cui non viene intaccato in modo diretto

¹ - Marston A., "The theory of external loads on closed conduits in the light of latest experiments"; Bulletin 96, Engineering experiment station, Iowa State College; Ames, Iowa, USA, 1930.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 11 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

il prisma di terreno soprastante la tubazione. Il carico per unità di lunghezza del manufatto, dato dal peso specifico del terreno sul tubo in condizioni trenchless deriva da:

$$G_t = c_d \cdot \gamma_t \cdot D^2 - 2 \cdot C \cdot c_d \cdot D$$

Trascurando, a vantaggio di sicurezza, il contributo della coesione del terreno C , G_t risulta dipendere solo dal diametro esterno D e dal coefficiente correttivo di carico c_d (maggiore di 1).

Fatte queste considerazioni, la formula di Marston-Spangler diviene:

$$G_t = c_d \cdot \gamma_t \cdot L_t^2$$

con:

- γ_t : peso per unità di volume del terreno soprastante il tubo;
- c_d : coefficiente correttivo di carico pari a:

$$c_d = \frac{1 - e^{\frac{-2k_a \mu H}{L_t}}}{2k_a \mu}$$

con:

- μ : coefficiente di attrito tra il terreno soprastante il tubo e il terreni delle pareti (verticali) della trincea:

$$\mu = \tan \phi$$

- k_a : coefficiente di spinta attiva esercitata dal terreno sulla condotta pari a:

$$k_a = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi}{2} \right)$$

Per la valutazione del carico geostatico dovuto al prisma di terreno soprastante il tubo si considera che quest'ultimo sia immerso in un mezzo omogeneo con angolo di attrito interno ϕ e coesione c costanti.

Per i terreni dotati di solo attrito e coesione nulla, le pressioni agenti sul tubo risultano superiori al caso in cui il terreno abbia valori significativi di coesione, come riportato nei risultati delle teorie di Caquot-Kerisel e di Terzaghi per il calcolo delle pressioni agenti sui rivestimenti delle gallerie. Inoltre la pressione agente sul tubo è esercitata in larga parte dal materiale costituente il rilevato stradale, per il quale può ipotizzarsi nullo il valore della coesione. Pertanto, come già cautelativamente assunto precedentemente, si trascura l'apporto della coesione e si assume il che il prisma di terreno soprastante il tubo sia dotato di solo comportamento attritivo.

La condotta è stata ipotizzata con un comportamento a tubo semirigido che si deforma sotto l'effetto dei carichi.

- Spangler M.G., "Pipeline crossing under railroads and highways", Journal American water works association, USA, 1964.

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 12 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

Di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei valori calcolati del carico geostatico:

CALCOLO DEL CARICO GEOSTATICO					
L_t [m]	μ	k_a	c_d	γ [kN/m ³]	G_t [kN/m]
0,92	0,65	0,295	2,61	19,8	43,38

Tabella 4. Riassunto dei valori calcolati

4.2.2 Carico idrostatico

In presenza di falda il tubo interrato è soggetto anche ad un carico G_w pari a:

$$G_w = \gamma_w \cdot \left(H - h_w - h_r + \frac{D_e}{2} \right) \cdot D_e$$

con:

- D_e : diametro esterno del tubo di linea in mm;
- γ_w : peso per unità di volume dell'acqua di falda;
- h_w : profondità della falda dal piano campagna, inteso come livello di colmo dei fossi di guardia;
- h_r : altezza del rilevato dal piano campagna, inteso come livello di colmo dei fossi di guardia.

Nel caso di trenchless profonde come quelle per tecnologia T.O.C., in terreni argillosi che risultano altamente addensati, il carico idrostatico viene cautelativamente integrato attraverso il carico geotecnico dovuto al prisma di terreno soprastante mediante peso specifico saturo, ovvero in tensioni totali.

Ritenendo inoltre influente il livello di acqua a livello di colmo dei fossi di guardia, di seguito si riporta la tabella riassuntiva dei valori calcolati del carico idrostatico.

CALCOLO DEL CARICO IDROSTATICO					
D_e [m]	γ_w [kN/m ³]	h_w [m]	h_r [m]	H [m]	G_w [kN/m]
0,92	10,00	0	1,6	16,5	140,74

Tabella 5. Riassunto dei valori calcolati

Vista la presenza dei fossi laterali, cautelativamente si assume la falda a livello campagna, ovvero $h_w = 0.00$ m, risultando così un carico idrostatico **$G_w = 140.74$ kN/m**

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 13 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

4.2.3 Carico variabile dovuto al traffico

Per la valutazione dei carichi variabili da traffico si fa riferimento al punto 5.1.3.3.2 del DM 17/01/2018. La sede stradale è composta da una o più carreggiate eventualmente divise da uno spartitraffico, da banchine o marciapiedi secondo l'importanza, la funzione e le caratteristiche della strada. La geometria viene così definita:

- w : larghezza della carreggiata;
- w_l : larghezza della corsia convenzionale su una carreggiata;
- se le parti sono separate da una barriera di sicurezza fissa, ciascuna parte, incluse le corsie d'emergenza e le banchine, è autonomamente divisa in corsie convenzionali (ved. Figura 1).

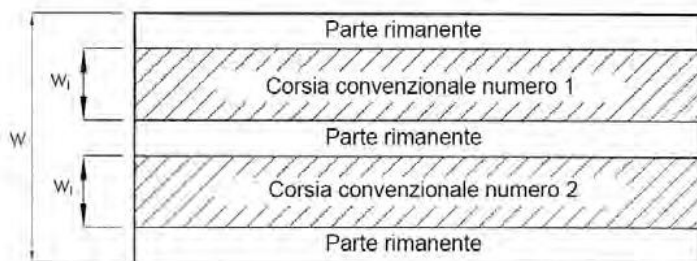


Figura 1. Esempio di numerazione delle corsie.

- se le parti sono separate da barriere di sicurezza mobili l'intera carreggiata, inclusa la zona di spartitraffico centrale, è divisa in corsie convenzionali.
- n_c : numero di corsie in una carreggiata definite secondo la *Tabella 6*;
- $w - (n_c \times w_l)$: larghezza rimanente della carreggiata.

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 14 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

DEFINIZIONE DELLE CORSIE CONVENZIONALI			
Larghezza di carreggiata w [m]	Numero di corsie convenzionali n_c	larghezza della corsia convenzionale w_i [m]	Larghezza della zona rimanente $w - (n_c \times w_i)$ [m]
$w < 5.40$	1	3.00	$(w - 3.00)$
$5.40 \leq w < 6.00$	2	$\frac{W}{2}$	0
$6.00 \leq w$	$\text{Int} \left(\frac{W}{3} \right)$	3.00	$w - (3.00 \times n_c)$

Tabella 6. Numero e larghezza delle corsie convenzionali

La disposizione e numerazione delle corsie va determinata in modo che gli effetti della disposizione dei carichi riproduca la condizione di progetto più sfavorevole, nel nostro caso coincide con lo schema 1 descritto nel punto 5.1.3.3.3. del DM 17/01/2018: carichi concentrati su due assi tandem Q_k , applicati su impronte di pneumatico di forma quadrata e lato 0.40 m, e da carichi uniformemente distribuiti q_k (ved. Figura 2).

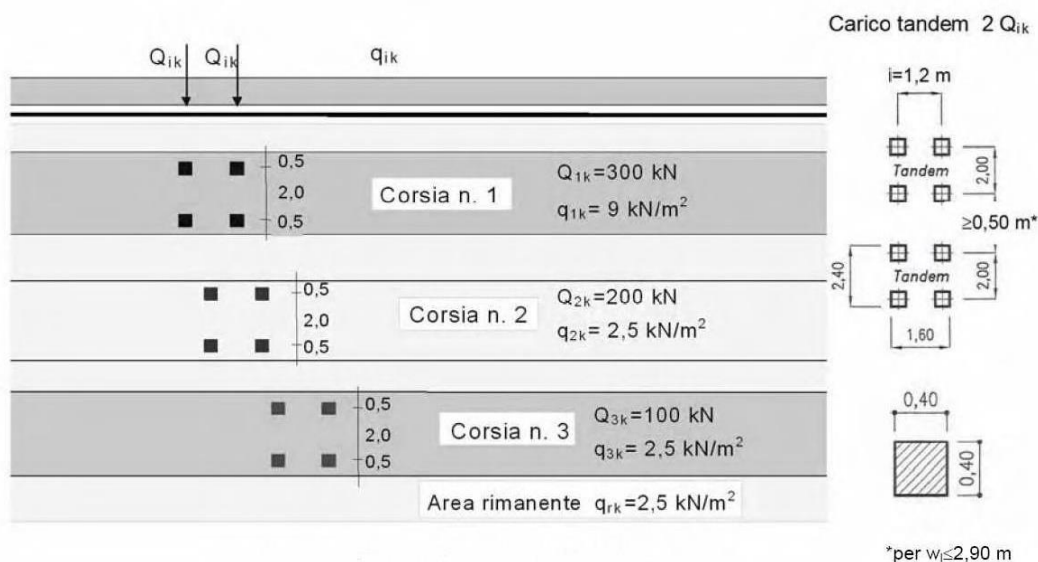


Figura 2. Schema di carico 1 (dimensioni in metri)

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 15 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

I valori di Q_k e q_k sono definiti nella *Tabella 7* sotto riportata:

INTENSITA' DEI CARICHI		
<i>Posizione</i>	<i>Carico asse concentrato</i> $Q_{ik} [kN]$	<i>Carico uniformemente distribuito</i> $q_{ik} [kN/m^2]$
Corsia principale	300.00	9.00
1 ^a corsia di sorpasso	200.00	2.50
2 ^a corsia di sorpasso	100.00	2.50
Altre corsie	0.00	2.50
Parte restante	0.00	2.50

Tabella 7. Intensità dei carichi Q_{ik} e q_{ik} per le diverse corsie

Nel nostro caso, sotto l'ipotesi di trincea stretta di larghezza L_t , si considera agente sulla tubazione un solo carico tandem per ogni corsia.

Per il calcolo delle sollecitazioni, come già detto in precedenza, si considerano i carichi concentrati Q_k applicati su impronte di pneumatico di forma quadrata di lato 0.40 m, di interassi 1.2 e 2.0 m rispettivamente nelle direzioni parallele e ortogonale all'asse della corsia, e un carico uniformemente distribuito q_k .

In base alla profondità massima H_{max} di interrimento della condotta (per essere a favore di sicurezza) vengono quindi calcolati i valori dell'incremento di tensione indotta dai carichi mobili sulla condotta nelle sezioni più sfavorite individuate sull'asse della corsia n.1 e lungo l'asse dei carichi dei semiassi.

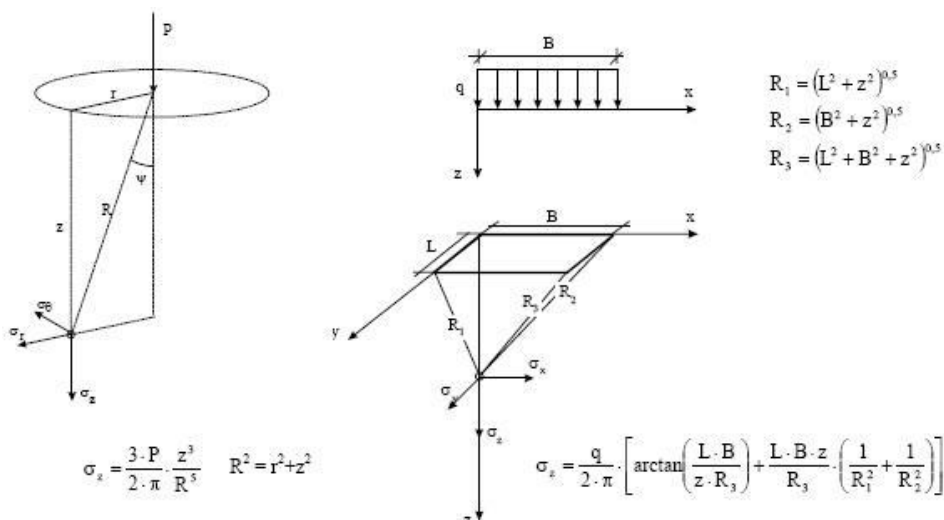


Figura 3. Incrementi di pressione indotti dai carichi alla profondità z secondo la teoria di Boussinesq

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 16 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

Nella Figura 3 sono riportate le espressioni di σ_z secondo la teoria di Boussinesq per una pressione uniforme su una superficie rettangolare e per un carico verticale concentrato P agente in superficie.

La tensione complessiva agente è ottenuta sovrapponendo gli effetti dovuti all'azione contemporanea dei carichi P pari a $Qk/2$ (carichi per ogni impronta di pneumatico) e ai carichi uniformemente distribuiti q_k nella condizione peggiore.

Il sovraccarico mobile agente sulla condotta a profondità H risulta:

$$G_m = \sigma_z \cdot L_t$$

con:

- σ_z : incremento di pressione verticale indotto dal sovraccarico mobile alla profondità $z=H$ determinato sulla base della teoria di Boussinesq.

Nella seguente tabella sono riportati i risultati dei calcoli effettuati per le corsie attraversate individuando la verticale lungo la quale si hanno le massime sollecitazioni indotte, nel caso in esame nel baricentro del primo tandem sulla prima corsia:

CALCOLO DELLE TENSIONE INDOTTE (carichi concentrati)						
Corsia	Carico P [kN]	Posizione carico		Distanza orizzontale r [m]	Distanza R [m]	Tensione indotta σ_z [kN/m ²]
		x [m]	y [m]			
Corsia n.1	150	-0,6	-1	1,17	16,54	0,260
	150	-0,6	1	1,17	16,54	0,260
	150	0,6	1	1,17	16,54	0,260
	150	0,6	-1	1,17	16,54	0,260
Corsia n.2	150	-0,6	-2	2,09	16,63	0,253
	150	-0,6	-4	4,04	16,99	0,227
	150	0,6	-4	4,04	16,99	0,227
	150	0,6	-2	2,09	16,63	0,253
Corsia n.3	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Parte restante	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
	-	-	-	-	-	-
Tensione indotta totale					$\Sigma\sigma_z =$	2.00

Tabella 8. Incremento di pressioni dovuto ai carichi variabili da traffico (concentrati).

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 17 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

CALCOLO DELLE TENSIONE INDOTTE (carico distribuito)							
Corsia	Carico q [kN/m ²]	Dimensioni carico		Distanze			Tensione indotta σ_z [kN/m ²]
		L [m]	B [m]	R_1 [m]	R_2 [m]	R_3 [m]	
Corsia n.1	9,00	3,00	0,92	16,77	16,53	16,80	0,084
Corsia n.2	9,00	3,00	0,92	16,77	16,53	16,80	0,084
Corsia n.3	-	-	-	-	-	-	-
Parte restante	-	-	-	-	-	-	-
Tensione indotta totale						$\Sigma \sigma_z =$	0.17

Tabella 9. Incremento di pressioni dovuto ai carichi variabili da traffico (uniformemente distribuito).

CALCOLO DEL CARICO VARIABILE DOVUTO AL TRAFFICO				
σ_{zQ} [kN/m ²]	σ_{zq} [kN/m ²]	$\Sigma \sigma_z$ [kN/m ²]	L_t [m]	G_m kN/m
2,00	0,17	2,17	0,92	1,99

Tabella 10. Riassunto dei valori calcolati

4.2.4 Peso proprio della condotta

Nella seguente tabella si definisce il peso proprio per unità di lunghezza del tubo di linea G_p, il valore del carico permanente agente sul tubo stesso:

CALCOLO DEL PESO PROPRIO			
D_e [m]	γ_s [kN/m ³]	t [mm]	G_p [kN/m]
0,9164	78,5	14,20	315,92

Tabella 10. Riassunto dei valori calcolati

4.3 Calcolo delle deformazioni e verifica all'ovalizzazione

L'espressione delle deformazioni Δx per condotte interrate flessibili dovute ad un carico generico G_k è fornita dalla seguente formulazione (Spangler):

$$\Delta x(G_k) = \frac{c_x \cdot G_k \cdot k_\beta \cdot R_m^3}{EJ + 0.061 \cdot E_t \cdot R_m^3}$$

con:

- E : modulo di elasticità dell'acciaio;

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 18 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

- c_x : costante di ritardo che tiene conto dell'incremento nel tempo dei carichi indotti dal terreno, variabile tra 1 e 1.5 in funzione del grado di costipamento del terreno di riempimento; per terreni addensati quali i casi di sottofondo stradale e per condizioni di esecuzione trenchless, si può assumere unitario; ad ogni modo, cautelativamente si assume $c_x = 1.5$;
- J : momento di inerzia della parete dell'anello pari a $\frac{t^3}{12}$;
- R_m : raggio medio dell'anello pari a $\frac{(D-t)}{2}$;
- k_β : coefficiente di deflessione, funzione dell'angolo β di appoggio tra tubo e terreno, desunto dai valori riportati in *Tabella 12*; per posa con tecnica T.O.C. si considera un rinterro con $\beta=180^\circ$;

VALORI k_β	
$\beta [^\circ]$	k_β
0	0.11
30	0.108
60	0.103
90	0.096
120	0.089
150	0.085
180	0.083

Tabella 12. Valori di k_β in funzione di β

- E_t : modulo di reazione laterale del terreno di riempimento in funzione del grado di compattazione; il materiale di rinterro nel caso di T.O.C. è il terreno naturale.

Per ponti di prima categoria i carichi mobili per la verifica degli stati deformativi vengono assunti con il loro intero valore. La combinazione di carico agli SLE risulta quindi essere data dalla semplice somma dei termini di carico:

$$G_d = G_t + G_w + G_p$$

$$G_{md} = G_m$$

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 19 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

CALCOLO DELLA DEFORMAZIONE DOVUTA AI CARICHI PERMANENTI							
E [N/mm ²]	J [mm ³]	c_x	G_d [N/mm]	k_β	R_m [mm]	E_t [N/mm ²]	Δx_d [mm]
210000	238,61	1,5	197,75	0,083	451,1	13,8	17,742

Tabella 13. Ovalizzazione dovuta ai carichi permanenti.

CALCOLO DELLA DEFORMAZIONE DOVUTA AL CARICO VARIABILE							
E [N/mm ²]	J [mm ³]	c_x	G_{md} [N/mm]	k_β	R_m [mm]	E_t [N/mm ²]	Δx_{md} [mm]
210000	238,61	1,5	1,99	0,083	451,1	13,8	0,178

Tabella 14. Riassunto del carico variabile

La deformazione complessiva Δx_{tot} dovuta all'effetto contemporaneo dei carichi permanenti e variabili si ottiene per sovrapposizione degli effetti. Il terreno di rinterro sarà quello attualmente esistente però con un grado di costipamento Proctor adeguato.

Il valore della deformazione ammissibile è fissato in relazione delle caratteristiche meccaniche del tubo e della tipologia dell'attraversamento. Al fine di operare un giusto compromesso tra la sicurezza strutturale del tubo e l'integrità del manto stradale superficiale, si assume il seguente valore deformativo ammissibile pari al 3% del diametro nominale DN come suggerito dalla AWWA (American Water Works Association) per le condotte semirigide:

$$\Delta x_{tot} < \Delta x_{amm} = 0.03 \cdot DN$$

VERIFICA ALL' OVALIZZAZIONE			
Δx_d [mm]	Δx_{md} [mm]	Δx_{tot} [mm]	Δx_{amm} [mm]
17,742	0,178	17,920	27,00
$\Delta x_{tot} < \Delta x_{amm}$ VERIFICATO			

Tabella 15. Riassunto dei valori calcolati

4.4 Calcolo delle sollecitazioni e verifica della resistenza del tubo di linea

Il calcolo delle sollecitazioni massime nelle varie sezioni della condotta (verticale inferiore, superiore e orizzontale mediana) è effettuato in funzione delle deformazioni secondo le seguenti espressioni:

- Sezione verticale inferiore:

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 20 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

$$M_b = \Delta x_{tot} \cdot \left(\frac{k_b}{k_\beta} \right) \cdot \frac{EJ}{R_m^2}$$

- Sezione verticale superiore:

$$M_t = \Delta x_{tot} \cdot \left(\frac{k_t}{k_\beta} \right) \cdot \frac{EJ}{R_m^2}$$

- Sezione verticale mediana:

$$M_s = \Delta x_{tot} \cdot \left(\frac{k_s}{k_\beta} \right) \cdot \frac{EJ}{R_m^2}$$

con:

- E : modulo di elasticità dell'acciaio;
- J : momento di inerzia della parete dell'anello pari a $\frac{t^3}{12}$;
- R_m : raggio medio dell'anello pari a $\frac{(D-t)}{2}$;
- Δx_{tot} : deformazione totale calcolata moltiplicando le azioni per i coefficienti parziali di sicurezza relativi alle combinazioni di carico agli SLU.

Secondo tali combinazioni di carico i valori di calcolo rispettivamente per i carichi permanenti e variabili G_d e G_{md} agenti sulla tubazione interrata in esame sono:

$$G_d = \gamma_{G1} \cdot G_t + \gamma_{G1} \cdot G_p + \gamma_{G1} \cdot G_w$$

$$G_{md} = \gamma_{Q1} \cdot G_m$$

con:

- γ_{G1} : coefficiente moltiplicativo dei carichi permanenti strutturali pari a 1.00 se favorevoli, 1.35 se sfavorevoli (per condotta interrata il terreno è considerato alla pari di un carico permanente strutturale);
- γ_{Q1} : coefficiente moltiplicativo dei carichi variabili da traffico pari a 0.00 se favorevoli, 1.35 se sfavorevoli.

CALCOLO CARICO PERMANENTE				
G_t [kN/m]	G_p [kN/m]	G_w [kN/m]	γ_{G1}	G_d [kN/m]
43,38	3,16	151,21	1,35	266,96

Tabella 16. Riassunto del calcolo del carico permanente

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 21 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

CALCOLO CARICO VARIABILE		
G_m [kN/m]	γ_{Q1}	G_{md} [kN/m]
1,99	1,35	2,68

Tabella 17. Riassunto del calcolo del carico variabile

CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI NELLA SEZIONE VERTICALE INFERIORE						
Δx_{tot} [mm]	K_b	K_β	E [N/mm ²]	J [mm ³]	R_m [mm]	M_b [N]
24,19	0,125	0,083	210000	238,61	451,1	8971,44

Tabella 18. Riassunto del calcolo delle sollecitazioni della sezione verticale inferiore

CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI NELLA SEZIONE VERTICALE SUPERIORE						
Δx_{tot} [mm]	K_t	K_β	E [N/mm ²]	J [mm ³]	R_m [mm]	M_t [N]
24,19	0,125	0,083	210000	238,61	451,1	8971,44

Tabella 19. Riassunto del calcolo delle sollecitazioni della sezione verticale superiore

CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI NELLA SEZIONE VERTICALE MEDIANA						
Δx_{tot} [mm]	K_s	K_β	E [N/mm ²]	J [mm ³]	R_m [mm]	M_s [N]
24,19	0,125	0,083	210000	238,61	451,1	8971,44

Tabella 20. Riassunto del calcolo delle sollecitazioni della sezione verticale mediana

Mentre le tensioni circonferenziali sono così ottenute:

- Sezione verticale inferiore:

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W}$$

- Sezione verticale superiore:

$$\sigma_t = \frac{M_t}{W}$$

- Sezione verticale mediana:

$$\sigma_s = \frac{M_s}{W}$$

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 22 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

con:

- W : modulo di rigidezza flessionale della parete del tubo pari a

$$W = \frac{t^2}{6};$$

- t : spessore del tubo di linea.
- K_b, K_t, K_s : coefficienti adimensionali calcolati in funzione dell'angolo di appoggio secondo la *Tabella 21*;

β [°]	K_b	K_t	K_s
0	0.294	0.153	0.150
30	0.235	0.152	0.148
60	0.189	0.147	0.143
90	0.157	0.14	0.137
120	0.138	0.133	0.131
150	0.128	0.127	0.126
180	0.125	0.125	0.125

Tabella 21. Valori di K_b, K_t, K_s in funzione di β

Si verifica che l'acciaio, sottoposto alle tensioni circonferenziali calcolate, si mantenga in campo elastico e che quindi siano minori del carico unitario di snervamento:

$$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{amm}} = \frac{R_{t0.5}}{\gamma_M}$$

con:

- γ_M : coefficiente di sicurezza pari a 1.05 (*DM 17/01/2018*)

VERIFICA DELLA RESISTENZA DEL TUBO DI LINEA							
W mm^2	σ_b $[N/mm^2]$	σ_t $[N/mm^2]$	σ_s $[N/mm^2]$	γ_M	$R_{t0.5}$ MPa	σ_{\max} $[N/mm^2]$	σ_{amm} $[N/mm^2]$
33,61	266,95	266,95	266,95	1,05	450	266,95	428,57
$\sigma_{\max} < \sigma_{\text{amm}}$ VERIFICATO							

Tabella 22. Verifica della resistenza del tubo di linea

4.5 Verifica al buckling

Si verifica che le caratteristiche del tubo impediscano fenomeni di plasticizzazione innescati con la pressione esercitata dai carichi verticali agenti sulla sezione del tubo (verifica al buckling).

Per un anello circolare sottoposto a pressione esterna uniforme il valore della pressione critica vale (ved. Tabella 23):

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 23 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

$$(1) \quad p_{cr} = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot R_m^3 \cdot (1 - \nu^2)} \quad \text{per } \sigma_{cr} = \frac{p_{cr} \cdot R_m}{t} < R_{t0.5}$$

$$(2) \quad p_{cr} = \frac{t}{R_m} \cdot \frac{(R_{t0.5})}{\left(1 + 4 \cdot \frac{(R_{t0.5} \cdot R_m^2)}{E \cdot t^2}\right)} \quad \text{per } \sigma_{cr} = \frac{p_{cr} \cdot R_m}{t} \geq R_{t0.5}$$

con:

- ν : modulo di Poisson;
- E : modulo elastico dell'acciaio;
- R_m : raggio medio;
- t : spessore del tubo di linea.

CALCOLO DELLA PRESSIONE CRITICA						
E [N/mm ²]	ν	t [mm]	R_m [mm]	$R_{t0.5}$ [N/mm ²]	σ_{cr} [N/mm ²]	p_{cr} [N/mm ²]
210000	0,3	14,2	451,1	450	57,16747	1,80

Tabella 23. Calcolo della pressione critica nel caso in esame

Se in presenza di ovalizzazione iniziale Δx , la pressione critica si riduce ed è data dalla soluzione dell'equazione:

$$p_{sn}^2 - B \cdot p_{sn} + C = 0$$

$$p_{sn} = \frac{\sqrt{(B - (2 \cdot B - 4 \cdot C))}}{2}$$

dove B, C sono tutti calcolati in funzione di P_{cr} calcolato in precedenza con l'espressione (1) o (2):

$$B = \frac{R_{t0.5} / \gamma_M}{m} + (1 + 6 \cdot m \cdot n) p_{cr}$$

$$C = \frac{R_{t0.5} / \gamma_M}{m} p_{cr}$$

con:

$$m = \frac{R_m}{t}$$

	PROGETTISTA techfem	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 24 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

$$\bullet \quad n = \frac{\Delta x}{R_m}$$

Per la verifica al buckling si confronta la pressione critica p_{sn} con la massima pressione agente sul tubo p_{vd} dovuta ai carichi verticali. Deve risultare che:

$$p_{vd} = \frac{P_{vd}'}{D_e} < p_{sn}$$

con:

- D_e : diametro esterno del tubo di linea in mm;
- P_{vd}' : carico verticale totale dato dalla somma del carico geostatico G_t , idrostatico G_w , peso proprio della tubazione di linea G_p e carichi mobili G_m secondo la seguente espressione e mostrato nella *Tabella 24*:

$$P_{vd}' = \gamma_{G1} \cdot G_p + \gamma_{G1} \cdot G_t + \gamma_{G1} \cdot G_w + \gamma_{Q1} \cdot G_m$$

CALCOLO DEL CARICO VERTICALE TOTALE						
G_p	G_t	G_w	G_m	γ_{G1}	γ_{Q1}	P_{vd}'
[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]	[kN/m]			[kN/m]
3,16	43,38	151,21	1,99	1,35	1,35	269,64

Tabella 24. Calcolo del carico verticale totale

La verifica al buckling del caso in esame viene riportata nella seguente Tabella 25:

VERIFICA AL BUCKLING							
m	n	B	C	D_e [mm]	p_{cr} [N/mm ²]	p_{sn} [N/mm ²]	p_{vd} [N/mm ²]
31,77	0,05	33,69	24,28	916,40	1,80	0,74	0,29
$p_{vd} < p_{sn}$ VERIFICATO							

Tabella 25. Verifica al buckling

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 25 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

5 CARATTERISTICHE TECNICHE DELLE CONDOTTE IN OPERA

5.1 Tubo di Linea DN 900 (36")

La condotta è costituita da tubi DN 900 (36") in acciaio EN L450 NB/MB di spessore maggiorato pari a 14.2 mm. Le estremità sono calibrate e smussate tali da consentire l'unione mediante saldatura elettrica di testa ad arco sommerso.

I tubi sono rivestiti esternamente da una pellicola in polietilene dello spessore di 3.30 mm avente funzione di protezione passiva onde garantire il completo isolamento elettrico e l'integrità dell'acciaio nel tempo, insieme all'impianto di protezione catodica attiva.

5.2 Protezione Catodica

La condotta interrata è protetta dalla corrosione con:

- una protezione passiva esterna in polietilene, di adeguato spessore, ed un rivestimento interno in vernice epossidica; i giunti di saldatura sono rivestiti in cantiere con fasce termorestringenti di polietilene;
- una protezione attiva (catodica), attraverso un sistema di corrente impressa con apparecchiature poste lungo la linea che rende il metallo della condotta elettricamente più negativo rispetto all'elettrolita circostante (terreno, acqua, ecc.).

La protezione attiva viene effettuata mediante trasformatori dotati di circuiti automatici che mantengono il potenziale della tubazione più negativo o pari a -1V rispetto all'elettrodo di riferimento Cu - CuSO₄.

5.3 Polifora Portacavi e telecontrollo

Negli attraversamenti in T.O.C., insieme alla condotta sarà posta in opera una polifora portacavi costituita da 3 tubi in PEAD DN 50-PN16 rigati internamente con diametro interno 36,2 mm e diametro esterno 50 mm.

All'interno di uno dei 3 tubi in PEAD verrà alloggiato il cavo per telemisura e telecontrollo a sussidio del gasdotto, mentre gli altri due tubi portacavo hanno funzione di scorta e manutenzione.

I tubi in PEAD DN 50 saranno alloggiati all'interno di un tubo in ferro DN 200 (8") di spessore 7.0 mm denominato tubo di protezione per polifora portacavi che verrà posato mediante trivellazione orizzontale controllata dedicata, ad una distanza compresa tra i 6 ed 8 m dal metanodotto in progetto.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 26 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

6 GEOMETRIA E MODALITÀ ESECUTIVE

6.1 Geometria dell'attraversamento

La geometria dell'attraversamento indicata nell'allegato DIS-AT-5C-37285, tiene conto di quanto previsto nel *D.M.17/04/2008*.

Le coperture della T.O.C. rispetto al piano campagna sono da considerarsi valori minimi da rispettare durante l'esecuzione della trivellazione controllata, la geometria finale esecutiva sarà verificata e stabilita dalla ditta esecutrice sulla base di dettagliate indagini geognostiche e dallo stato dei luoghi al momento della realizzazione dell'opera (come ad esempio la presenza di aree allagate, altezza della falda, ecc..).

6.2 Telecontrollo/telecomando

A sussidio del metanodotto principale, lungo la condotta, sarà predisposta e messa in opera una polifora portacavi telecomunicazioni, con cavo di telecontrollo; la polifora sarà interrotta nelle posizioni più opportune da pozzetti rompitratta per favorire sia l'infilaggio del cavo telecomunicazioni sia per l'alloggiamento delle giunzioni delle pezzature di cavo telecomunicazione. La polifora sarà composta da una serie di 3 tubi in PEAD PN16 rigati internamente con diametro interno 36,2 mm e diametro esterno 50 mm. Nei tratti in cui la condotta sarà posata in trenchless, anche la polifora sarà posata con la medesima tecnologia, ubicata ad una distanza compresa tra i 6 ed 8 m dal metanodotto in progetto.

6.3 Modalità esecutive della posa del metanodotto in progetto

L'utilizzo della tecnica T.O.C. ha come vantaggio quello di poter mantenere la viabilità dell'infrastruttura da attraversare e di evitare possibili cedimenti della sede stradale.

La strada provinciale non verrà interessata dai lavori, la profondità minima della tubazione dal piano stradale sarà maggiore di 16.50 m e non saranno necessarie opere di ripristino.

Nell'elaborato grafico di dettaglio DIS-AT-5C-37285 oltre alla geometria dell'attraversamento sono riportate le seguenti informazioni di progetto:

- Diametro interno e/o esterno, spessore e tipo di acciaio della condotta di linea;
- Lunghezza complessiva della T.O.C. e lunghezze parziali dei tratti rettilinei e curvilinei
- Angoli di ingresso e uscita e raggio di curvatura;
- Copertura minima dal piano campagna;
- Dimensioni indicative dell'area per la catenaria di varo;

6.3.1 Descrizione generale metodologia T.O.C.

Il procedimento della Trivellazione Orizzontale Controllata è un miglioramento della tecnologia e dei metodi sviluppati per la perforazione direzionale di pozzi petroliferi.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 27 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

Il procedimento impiegato nella maggioranza degli attraversamenti mediante Trivellazione Orizzontale Controllata è a due fasi. La prima consiste nella trivellazione di un foro pilota di piccolo diametro lungo un profilo direzionale prestabilito.

La seconda implica l'allargamento di questo foro pilota fino ad un diametro tale da permettere l'alloggiamento, tramite il tiro-posa, del servizio da porre in opera.

1. Esecuzione del foro pilota e controllo direzionale

Il foro pilota viene realizzato facendo avanzare la batteria di aste pilota con in testa una lancia a getti di fango bentonitico che consente il taglio del terreno (jetting).

Nelle fasi di esecuzione del foro pilota, così come nelle successive fasi di alesaggio e varo della condotta, sarà previsto il monitoraggio in continuo della pressione del fango di perforazione al fine di eliminare ogni possibile interferenza tra le operazioni di trivellazione ed il sistema fisico circostante.

Al fine di minimizzare le interferenze con l'ambiente esterno e con le falde acquifere (a carattere esclusivamente fisico e comunque di entità molto limitata) si prevederà l'utilizzo di miscele bentonitiche (fango di perforazione) additivate con polimeri biodegradabili con alto potere coesivo ed alta fluidità con caratteristiche di riduttori di filtrato.

Questi accorgimenti consentiranno la saturazione di eventuali microfessurazioni che dovessero formarsi nell'intorno dell'asse di trivellazione, garantendo che durante l'esecuzione dell'attraversamento non si verifichi la formazione di vie preferenziali di filtrazione lungo l'asse di trivellazione.

La lancia a getti di fango bentonitico, consiste in una asta che presenta una deviazione di circa 1° e dispone di due ugelli, uno centrale rispetto alla testa e l'altro, eccentrico, in asse con la deviazione.

I cambi di direzione necessari sono ottenuti ruotando le aste di perforazione in modo tale che la direzione della deviazione coincida con quella desiderata (asse trivellazione).

Il tracciato del foro pilota sarà controllato durante la trivellazione da frequenti letture dell'inclinazione e dell'azimut all'estremità della testa di perforazione. Queste letture, unite ai dati relativi alla lunghezza delle aste di trivellazione già installate, saranno utilizzate per calcolare le coordinate orizzontali e verticali dell'estremità di testa rapportate al punto di inizio della trivellazione.

Di norma le misurazioni della posizione saranno eseguite ad ogni giunto del tubo pilota (circa 9-10 metri) e riportate sul disegno di progetto del profilo, in modo da avere un riscontro immediato delle eventuali deviazioni. Qualora si evidenziassero delle discordanze, l'asta pilota verrà ritirata per una lunghezza tale da permettere la correzione necessaria. Periodicamente durante la trivellazione del foro pilota, un tubo guida verrà fatto ruotare ed avanzare in modo concentrico sopra l'asta di perforazione pilota. Il tubo guida eviterà il bloccaggio dell'asta pilota, ridurrà gli attriti permettendo di orientare senza difficoltà l'asta di perforazione, e faciliterà il trasposto verso la superficie dei materiali di scavo. Esso, inoltre, manterrà aperto il foro, nel caso di necessità di ritiro dell'asta pilota.

Il foro pilota sarà completato quando sia l'asta pilota che il tubo guida fuoriusciranno alla superficie sul lato opposto al rig. L'asta pilota è quindi ritirata, lasciando il tubo guida lungo il profilo di progetto.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 28 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

2. Alesaggio del foro e tiro-posa della condotta

In base ai riscontri ottenuti durante la perforazione del foro pilota ed in base alle caratteristiche dei terreni attraversati, verrà deciso se effettuare contemporaneamente l'alesaggio ed il tiro della condotta oppure eseguire ulteriore alesaggio.

Questa fase consisterà nell'allargamento del foro pilota per mezzo di un alesatore. Tale operazione potrà essere eseguita prima del tiro-posa della condotta o contemporaneamente ad esso. Nel caso di prealesatura, la fresa ed i relativi accessori verranno fissati al tubo guida nel punto di uscita. Quindi la fresa verrà fatta ruotare e contemporaneamente tirata dal rig di perforazione, allargando in questo modo il foro pilota. Contestualmente all'avanzamento della testa fresante, dietro di essa verranno assemblate nuove aste di tubo guida per garantire la continuità di collegamento all'interno del foro.

Durante le fasi di trivellazione, di prealesatura e di tiro-posa, verrà impiegato del fango bentonitico. Questo fango, opportunamente dosato in base al tipo di terreno, avrà molteplici funzioni quali ridurre gli attriti nelle fasi di scavo, trasportare alla superficie i materiali di scavo, mantenere aperto il foro, lubrificare la condotta nella fase di tiro-posa e garantirne il galleggiamento.

3. Attrezzatura di perforazione e di tiro-posa

L'insieme del cantiere di perforazione è costituito dal rig vero e proprio, dall'unità di produzione dell'energia, dalla cabina di comando, dall'unità fanghi, dall'unità approvvigionamento idrico, dall'unità officina e ricambi, dalla trivella, dalle aste pilota, dalle aste di tubo guida, dalle attrezzature di alesaggio e tiro-posa e da una gru di servizio.

Tutte queste attrezzature saranno assemblate ed immagazzinate in container in modo da essere facilmente trasportabili su strada "in sagoma".

Nel seguito si riporta una descrizione sommaria delle attrezzature comunemente utilizzate:

- Rig: è costituito da una torre di perforazione posta su di un piano inclinato (slittone). Su di esso, trasla il carrello di perforazione completo con il motore idraulico che permette la rotazione del mandrino. Le aste di perforazione vengono installate sul mandrino e il loro montaggio e smontaggio viene eseguito con morse idrauliche.
- Cabina di comando: all'interno si trovano tutti i dispositivi per manovrare il rig e le altre attrezzature.
- Unità generatore di energia: è necessaria al funzionamento dell'impianto è generalmente costituita da una serie di motori elettrici o a scoppio che producono energia idraulica. Questa energia viene trasmessa al rig tramite la cabina di comando e serve per la traslazione del carrello e la perforazione del carrello.
- Unità fanghi: questa unità è costituita da una vasca, in cui vengono preparati i fanghi bentonitici per mezzo di una tramoggia venturi e di miscelatori; tramite pompe sommerse comandate dall'operatore i fanghi vengono immessi nel circuito. Gli stessi fanghi possono essere riciclati per una successiva utilizzazione grazie ad appositi filtri. La raccolta della bentonite sarà realizzata mediante scavo nel terreno di vasche opportunamente impermeabilizzate.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 29 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

- Unità approvvigionamento idrico: È costituita generalmente da una pompa sommersa ubicata nel corso d'acqua da attraversare. Tramite dei tubi flessibili (manichette) invia l'acqua necessaria alla preparazione dei fanghi alla vasca di miscelazione.
- Trivella: Per la trivellazione del foro pilota vengono utilizzate due tipi di trivelle, una a getti ed una a motore a fanghi. La trivella a getti è sostanzialmente un'asta di trivellazione con due fori sulla testa, uno centrale e l'altro eccentrico. La bentonite in pressione, fuoriuscendo dai fori esercita un'azione di scavo nel terreno. La trivella con motore a fanghi è costituita da una turbina, azionata dai fanghi in pressione, che imprime una rotazione ad uno scalpello posto sulla testa; i fanghi fuoriescono poi da un foro posto sullo scalpello. Gli scalpelli possono essere di diversi tipi a seconda delle condizioni di terreno incontrate. Questa trivella si completa con la scarpa direzionale, che è un ringrosso eccentrico dell'asta di perforazione posizionato a circa 1 metro dalla testa.
- Aste pilota: quelle comunemente usate sono normali aste di trivellazione da 2" 7/8. A seconda del sistema direzionale impiegato le aste possono essere dotate di giunti conici o cilindrici. Le aste di trivellazione ubicate proprio dietro la trivella sono in materiale amagnetico per non influenzare il sistema di controllo direzionale; queste aste sono fragili e si richiede molta cautela nel maneggiarle. In alcuni tipi di terreno è necessario l'utilizzo di un'asta pilota più resistente e sul mercato sono disponibili aste per tubo pilota da circa 5" 13/7 e oltre. Questi ultimi possono essere impiegati per la trivellazione di terreni molto compatti e di roccia tenera.
- Tubo guida: è costituito da aste di perforazione standard da 5" che soddisfano la maggioranza delle esigenze di tiro. In caso necessiti uno sforzo di tiro superiore alla norma, vengono utilizzate, nelle fasi più critiche aste rinforzate. Nel caso le aste sopra descritte non sopportino lo sforzo di tiro oppure servano grosse quantità di bentonite, si possono utilizzare aste da 7" o più.
- Attrezzature alesaggio e tiro-posa: queste attrezzature cambiano da ditta a ditta in base alle esperienze degli operatori, ai brevetti che le tutelano e ai terreni da attraversare.
- Alesatore: l'alesatore classico è formato da una corona dentata su cui sono posti da sei a nove ugelli per l'uscita dei fanghi e una quantità variabile di taglienti. Detti taglienti generalmente sono posizionati a gruppi di 3 o 5 e possono avere diverse caratteristiche meccaniche.
- Fresa a barilotto: La fresa a barilotto o barrel reamer è costituita da un cilindro bombato e dentato alle estremità completo con i soliti ugelli. Questo alesatore è molto utile se usato in coppia con il precedente, perché permette di mantenere sempre centrata la fresa rispetto al foro.
- Snodo: lo snodo/swivel è indispensabile per evitare che la condotta ruoti durante l'operazione di tiro-posa. Viene interposto tra la fresa e la condotta. Generalmente è costituito da un reggispira autolubrificante con un cuscinetto in teflon o rulli. È

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 30 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

indispensabile mantenere integro questo snodo per evitare il bloccaggio della condotta durante il tiro-posa.

4. Montaggio Della Condotta

Sulla sponda opposta a quella dove sarà posizionato il Rig verrà eseguito la prefabbricazione della colonna di varo.

Ove le dimensioni del cantiere e le attrezzature a disposizione lo consentano, la colonna di varo verrà preferibilmente assemblata in un'unica soluzione per evitare tempi di arresto, per saldature ed operazioni di controllo e rivestimento dei giunti, durante la fase di tiro-posa.

A saldatura completata verranno eseguiti i controlli non distruttivi delle saldature (radiografie) e successivamente si provvederà al rivestimento dei giunti di saldatura.

La colonna, prima del tiro-posa, verrà precollaudata idraulicamente.

Per l'esecuzione del tiro-posa verrà predisposta una linea di scorrimento della colonna (rulli, carrelli o sostentamento con mezzi d'opera).

Durante il varo, l'ingresso della condotta nel foro verrà facilitato, facendole assumere una catenaria predeterminata in base all'angolo d'ingresso nel terreno, al diametro ed al materiale della condotta; ciò permetterà di evitare sollecitazioni potenzialmente dannose sulla condotta da varare.

Al fine di ridurre al massimo le sollecitazioni indotte alla tubazione, durante la fase di tiro-posa, dovranno essere rigorosamente rispettati i valori di raggio minimo di curvatura elastica della tubazione.

Al termine dei lavori verrà redatto un elaborato riportante l'esatto posizionamento della condotta così come realmente posta in opera.

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 31 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

7 DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA

In questo capitolo è riportata la documentazione fotografica dello stato di fatto con indicata la direzione in rosso del tracciato di progetto. L'indicazione planimetrica dei punti di ripresa (con i relativi coni visivi), è riportata nella planimetria catastale di Figura 4.

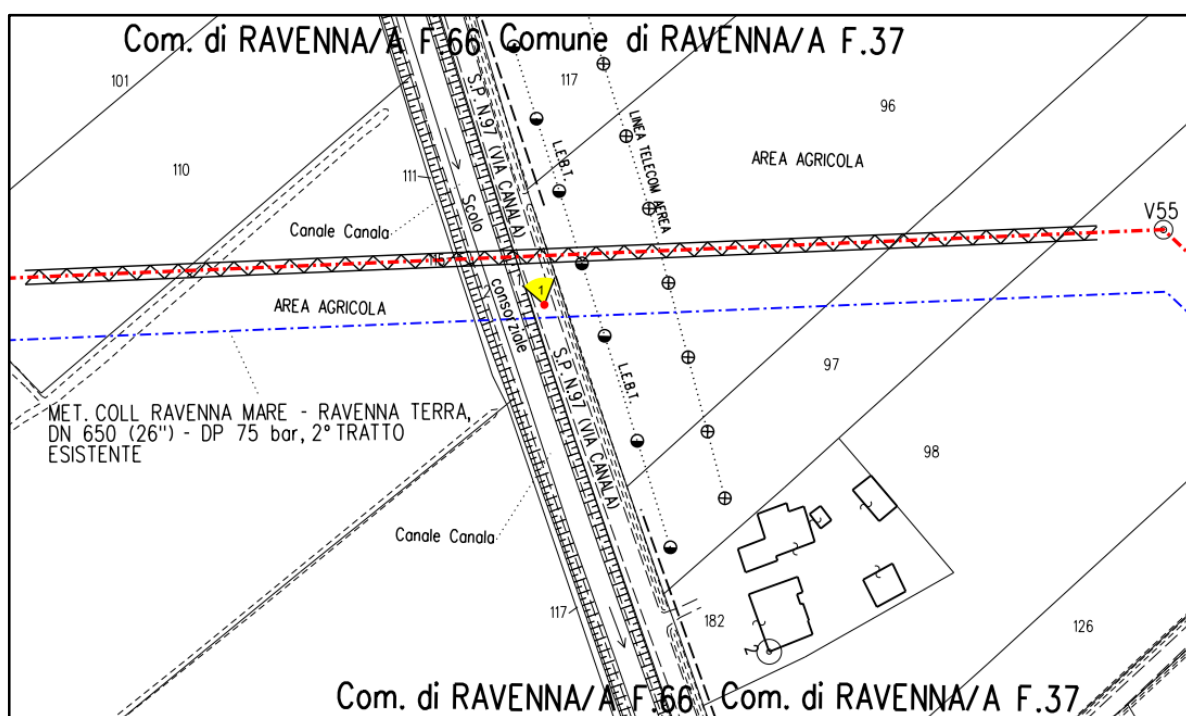


Figura 4: Stralcio planimetrico con punti di ripresa in corrispondenza dell'attraversamento della S.P. N. 97 con il metanodotto in progetto (in rosso)

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITÀ 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 32 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036



Foto 1: Attraversamento S.P. N.97 ed adiacente Canale "Canala", senso gas (in rosso l'andamento qualitativo della tubazione in TOC)

	PROGETTISTA 	COMMESSA NQ/R22178	UNITA 20
	LOCALITÀ RAVENNA	SPC. REL-AT-E-35036	
	PROGETTO FSRU RAVENNA E COLLEGAMENTO ALLA RETE NAZIONALE GASDOTTI	Pagina 33 di 33	Rev. 0

Rif. TFM: 011-PJM22-001-20-RT-E-5036

8 CONCLUSIONI

L'attraversamento in oggetto, progettato conformemente a quanto previsto nel D.M.17/04/2008 in particolare per quanto concerne la scelta progettuale dei materiali delle condotte e delle modalità di posa in opera della condotta, è tale da garantire la massima sicurezza sia dell'infrastruttura stradale che del metanodotto nelle fasi di costruzione e di esercizio di entrambe.

L'integrità della tubazione è altresì garantita dall'elevato approfondimento della condotta, la quale si troverà ad una profondità minima di oltre 16.50 metri dal piano di rotolamento dell'infrastruttura in oggetto, come evidenziato nell'elaborato grafico di riferimento di cui al par. 1.2.