



**Finanziato  
dall'Unione europea**  
NextGenerationEU



**Italiadomani**  
PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA



**Mims**  
Ministero delle infrastrutture  
e della mobilità sostenibili

## PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA M2C4 - I4.1

“INVESTIMENTI IN INFRASTRUTTURE IDRICHE PRIMARIE PER LA SICUREZZA DELL'APPROVVIGIONAMENTO IDRICO”



**CONSORZIO DI BONIFICA**  
della romagna occidentale

PROGETTO DI MESSA IN SICUREZZA E INCREMENTO DELLA RESILIENZA IDRICO-IDRAULICA DEI TERRITORI SOTTESI DAL CANALE "FOSSO VECCHIO" MEDIANTE COSTRUZIONE DI UNA CASSA DI ESPANSIONE CON FUNZIONE DI LAMINAZIONE DELLE PIENE E DI INVASO PER L'EFFICIENTAMENTO DELLA PRATICA IRRIGUA DA CANALI A RETE TUBATA IN PRESSIONE, NEI COMUNI DI BAGNACAVALLO, COTIGNOLA E FAENZA IN PROVINCIA DI RAVENNA.

*CUP I41B21003430008*

*CODICE INTERVENTO PNRR-M2C4-I4.1-A2-2*

## ATTRAVERSAMENTO FERROVIA CASTEL BOLOGNESE– RAVENNA Km 22 + 174

**ALL. 1**

**RELAZIONE TECNICA**



IL PROGETTISTA  
Dott. Ing. Elvio Cangini  
*Firmato digitalmente*

# INDICE

1	Premessa.....	2
2	Elenco documentazione.....	2
3	Normativa di riferimento.....	3
4	Caratteristiche geotecniche dei terreni.....	3
5	Caratteristiche geometriche dell'attraversamento .....	3
5.1	Tubo - camicia di protezione in acciaio.....	4
5.2	Dati di progetto del tubo di protezione e condotta.....	4
6	Calcolo delle sollecitazioni esterne.....	5
7	Verifica dello spessore del tubo di protezione .....	6
7.1	Verifica della sezione verticale superiore.....	7
7.2	Verifica della sezione orizzontale mediana.....	8
7.3	Verifica della sezione verticale inferiore.....	9
8	Smaltimento della portata in caso di rottura della condotta .....	11
9	Fasi di realizzazione e tempistiche presunte.....	11
10	Dimensionamento e verifica della condotta primaria.....	12
10.1	Introduzione.....	12
10.2.a	Regime di moto permanente.....	12
10.2.b	Regime di moto vario – verifica di colpo d'ariete.....	12
10.3	Verifica dello spessore della tubazione.....	15
11	Verifica dei pozzetti alla spinta idrostatica.....	15

## 1 - PREMESSA

La seguente relazione redatta dall'Ing. Elvio Cangini, iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Ravenna al n° 630, ha per oggetto la verifica delle opere di attraversamento di un rilevato ferroviario, relativo alla linea ferroviaria **Castel Bolognese – Ravenna al Km 22 +174**, località Bagnacavallo (RA), nelle vicinanze di Via Muraglione, (coordinate geografiche Latitudine 44°23'33.2"N; Longitudine 12°00'22.8"E fonte Google Earth) mediante tubo di protezione in acciaio, all'interno del quale dovrà essere inserita una condotta in PEAD DN 355.

Le opere in oggetto saranno realizzate nell'ambito dei lavori di messa in sicurezza e incremento della resilienza idrico-idraulica dei territori sottesi dal canale "Fosso Vecchio" mediante costruzione di una cassa di espansione con funzione di laminazione delle piene e di invaso per l'efficientamento della pratica irrigua da canali a rete tubata in pressione, nei comuni di Bagnacavallo, Cotignola e Faenza in provincia di Ravenna.

Tale progetto, approvato con Decreto del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili n. 517 del 16 dicembre 2021, ha trovato finanziamento tramite il PIANO NAZIONALE DI RIPRESA E RESILIENZA - MISURA M2C4 – I4.1 "Investimenti in infrastrutture idriche primarie per la sicurezza dell'approvvigionamento idrico" dell'investimento 4.1, Missione 2, Componente C4, le opere previste in progetto saranno dichiarate di pubblica utilità.

Il tubo di protezione in acciaio verrà inserito attraverso il terreno mediante una macchina spingi-tubo o presso-trivella; il diametro del tubo in acciaio da destinarsi come "tubo camicia" presenta un diametro esterno di 508 mm (DN 500).

La seguente relazione di calcolo riguarda esclusivamente la verifica dello spessore del tubo di protezione in acciaio.

## 2 – ELENCO DOCUMENTAZIONE

Alla domanda di concessione si allega la seguente documentazione tecnica:

- All. n° 1 Relazione tecnica;
- All. n° 2 Corografia;
- All. n° 3 Elaborato grafico;
- All. n° 4 Relazione generale di progetto;
- All. n° 5 Relazione tecnica idraulica di progetto;
- All. n° 6 Relazione geologica di progetto;
- All. n° 7 Documentazione fotografica;
- All. n° 8 Cronoprogramma;
- All. n° 9 Estratto catastale;
- All. n° 10 Piano di manutenzione, dismissione e spostamento dell'interferenza.
- All. n° 11 Bonifica ordigni bellici - Valutazione dei rischi

### **3 - NORMATIVA DI RIFERIMENTO**

*La risoluzione delle strutture facenti parte del presente progetto è stata effettuata nel rispetto della Normativa vigente ed in particolare delle seguenti disposizioni:*

- *Decreto Ministeriale del 04.04.2014 “Norme Tecniche per gli attraversamenti e i parallelismi di condotte e canali convoglianti liquidi e gas con ferrovie ed altre linee di trasporto”.*

*I calcoli e le verifiche sono stati effettuati secondo quanto previsto al punto 4 del sopra citato Decreto Ministeriale.*

- *“Norme tecniche per gli attraversamenti ed i parallelismi di ferrovie con condotte convoglianti acque in pressione”.*

*In particolare si è preso in riferimento quanto previsto al punto 4.4 – Tubo di protezione.*

### **4 - CARATTERISTICHE GEOTECNICHE DEI TERRENI**

Per gli attraversamenti in oggetto sono stati assunti i parametri geotecnici, desunti dalla relazione geologica e geotecnica, allegata alla presente.

Le indagini in sito hanno mostrato la presenza, fino a 14 metri di profondità, di alluvioni limoso-argillose di media consistenza. Sino a questa profondità si tratta evidentemente di alluvioni recenti (Olocene).

Seguono strati di terreni principalmente coesivi argilloso-limosi, con livelli sabbiosi superficiali (presenti nei primi 4÷5 m di profondità e legati ad esondazioni del fiume Lamone o di suoi paleovalvei) intercalazioni di limi sabbiosi o sabbie limoso-sabbiose, specialmente oltre i 10 m di profondità. L'intera colonna stratigrafica è costituita da depositi alluvionali.

Il livello della falda è stato rilevato tra i 10 m e i 15 m dalla superficie.

Il campione prelevato a m 5.20-5.70 consiste in limo sabbioso argilloso di media consistenza ( $qu=1.00-2.50$  kg/cmq) con angolo di attrito di  $30^\circ$ .

### **5 - CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELL'ATTRAVERSAMENTO**

La distanza minima tra il piano inferiore delle traverse e la generatrice superiore del tubo di protezione è uguale a:  $H = 8,59$  m

Il tubo guaina, lungo complessivamente 49,00 m e con pendenza del 2 ‰, viene infisso con la tecnica dello spingitubo o presso-trivella, con trivellazione da camera di spinta (a distanza superiore ai 10 m dal binario).

Fra la condotta irrigua e tubo camicia vengono frapposti idonei collari distanziatori realizzati completamente in materia plastica e atti a:

- assicurare l'isolamento elettrico tra i tubi;
- permettere l'agevole introduzione della condotta all'interno del tubo di protezione;
- essere bloccati sul tubo interno senza danneggiare il rivestimento durante le operazioni di infilaggio e installazione della condotta;
- consentire il libero deflusso dell'acqua in caso di rottura della condotta interna.

Alle estremità del tubo di protezione vengono realizzati due pozzetti per consentire l'ispezione della intercapedine libera fra la condotta e il tubo guaina.

Entrambe sono in c.a., sollevati dal piano campagna in modo tale che sia impedita la penetrazione di acque meteoriche, e muniti di sfioro in sommità per l'allontanamento dalla sede ferroviaria delle eventuali perdite. Entrambe sono muniti di chiusino in ghisa a tenuta stagna per l'accesso all'interno.

## 5.1 - TUBO DI PROTEZIONE IN ACCIAIO

Si utilizzeranno dei tubi in acciaio di qualità S275JR (norma UNI EN 10027-2016), saldabile, di spessore  $s=12,5$  mm e diametro DN = 500 mm;  $De= 508$  mm

Il peso di un metro lineare di tubo è uguale a:

$$p_{\text{tubo}} = 152,70 \text{ Kg/ml}$$

Il carico unitario di snervamento minimo è uguale a:  
 $ReH = 2.750,00 \text{ Kg/cm}^2$

La tensione massima ammissibile è uguale a:  
 $\sigma_{\text{adm}} = 0,50 * ReH = 0,50 * 2.750 = 1.375 \text{ Kg/cm}^2$

L'area e il modulo di resistenza della sezione radiale, considerando un metro lineare di tubo sono uguali a:

$$Ar = b * s = 100 * 1,25 \text{ cm}^2 = 125 \text{ cm}^2 \quad Wr = 1/6 b s^2 = 1/6 * 100 * 1,25^2 = 26,04 \text{ cm}^3$$

## 5.2 – DATI DI PROGETTO – TUBO CAMICIA E CONDOTTA (PEAD; DN= 355 mm)

In corrispondenza delle sezioni interessate dagli attraversamenti ferroviari la tubazione di linea è caratterizzata dai seguenti diametri e caratteristiche dei materiali:

Fluido trasportato:	Acqua		
Diametro nominale della condotta	DN	=	355 mm
Diametro esterno della condotta	$De_c$	=	355 mm
Diametro interno della condotta	$Di_c$	=	290,6 mm
Spessore della condotta	$S_c$	=	32,2 mm
Carico di snervamento minimo dell'acciaio impiegato per il tubo di protezione	$\sigma_c$	=	275 N/mm <sup>2</sup>
Pressione di esercizio effettiva dell'impianto	P	=	8 Bar
Pressione massima di tenuta della condotta	$P_{\text{max}}$	=	16 Bar
Pressione di collaudo	$P_c$	=	14,91 Bar
Diametro nominale tubo di protezione	DN	=	500 mm
Diametro esterno tubo di protezione	De	=	508 mm
Diametro interno tubo di protezione	Di	=	483 mm
Spessore del tubo di protezione (tipo saldabile)	s	=	12,50 mm

Tipo di ferrovia: Binario semplice

Il tracciato dell'attraversamento è rettilineo e forma con l'asse del binario un angolo di circa 90 gradi. L'attraversamento sarà eseguito con spingi tubo e la profondità di interrimento è rispondente a quanto prescritto nel D.M. 4/04/2014 n 137.

- Tubo in PEAD DN355 PN16

Peso tubo ( $p_{\text{cond}}$ ) = 32,92 Kg/ml

Nel caso specifico si ha:

Per i tubi in PEAD il diametro nominale (DN) corrisponde al diametro esterno; per cui si ha:  
Il peso dell'acqua contenuta nel tubo è uguale a:

$$\rho_{\text{acqua}} = 1000 \cdot (D_i / 2)^2 \cdot 3,14 = 1.000 \cdot (0,2906/2)^2 \cdot 3,14 = 65,94 \text{ Kg/ml}$$

## 6 - CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI ESTERNE

Nella valutazione dell'analisi dei carichi (sollecitazioni esterne) si tiene conto dei seguenti casi:

### a) *Peso proprio del tubo di protezione*

Il peso proprio del tubo di protezione in acciaio, già calcolato in precedenza, è pari a:

$$\rho_{\text{tubo}} = 152,70 \text{ Kg/ml}$$

### b) *Carico ripartito superiore*

Nel caso in esame  $H=8,59 \text{ m}$

Il carico è formato da due aliquote:

$$p = \gamma_t \cdot H + \alpha \text{ (N/m}^2\text{) dove:}$$

$\gamma_t$  = peso specifico del terreno ( $\text{N/m}^3$ );

$H$  = profondità di interrimento tubo di protezione (m);

$\rho_{\text{sovr}} = \alpha$  = carico mobile transitante come indicato nel D.M. paragrafo 4.4.2 ( $\text{daN/m}^2$ )

Peso del terrapieno sovrastante la tubazione =  $\rho_{\text{terrap}}$

Peso del carico mobile transitante sul binario =  $\rho_{\text{sovr}}$

$$\rho_{\text{terrap}} = \gamma_{\text{terreno}} \cdot H = 1850 \cdot 8,59 = 15.891,50 \text{ Kg/m}^2$$

Nel caso di ferrovie a semplice binario la formula da utilizzare è la seguente:

$$\rho_{\text{sovr}} = 15.000 / (2,60 + 1,5 H) = 15.000 / (2,60 + 1,50 \cdot 8,59) = 968,79 \text{ Kg/m}^2$$

Il carico superiore totale ripartito gravante sul tubo è uguale a:

$$\rho_{\text{rip,sup}} = \rho_{\text{terrap}} + \rho_{\text{sovr}} = 15.891,50 + 968,79 = 16.860 \text{ Kg/m}^2$$

### c) *Carico ripartito laterale*

Il valore del carico ripartito laterale, corrispondente alla parte rettangolare del diagramma di spinta (terra + sovraccarico), con angolo d'attrito interno  $\Phi=30^\circ$ , è uguale a:

$$q_{\text{rip, lat}} = \gamma_{\text{terreno}} \cdot H \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \Phi / 2) + \rho_{\text{sovr}} \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \Phi / 2) = [1.850 \cdot 8,59 \cdot \text{tg}^2(30)] + [968,79 \cdot \text{tg}^2(30)] = 5.297,17 + 322,93 \text{ Kg/m}^2 = 5.620,10 \text{ Kg/m}^2$$

### d) *Carico triangolare laterale*

Il valore del carico ripartito laterale, corrispondente alla parte triangolare del diagramma di spinta (terra) è uguale a:

$$z_{\text{tri, lat}} = \gamma_t \cdot D_{\text{tubo}} \cdot \text{tg}^2(45^\circ - \Phi / 2) = 1.850 \cdot (0,508) \cdot \text{tg}^2(30^\circ) = 313,27 \text{ Kg/m}^2$$

### e) Reazione radiale costante

La reazione radiale costante Q, in un settore corrispondente ad un angolo al centro di 60°, pari alla somma di tutti i carichi verticali agenti sulla tubazione, è uguale a:

$$Q = p_{\text{tubo}} + p_{\text{cond}} + p_{\text{acqua}} + p_{\text{rip,sup}} = 152,70 + 32,92 + 65,84 + 16.860 = 17.111,46 \text{ Kg} \approx 17.111 \text{ Kg}$$

La reazione radiale costante vale:

$$Q_r = D_{\text{tubo}} * \pi/6 * Q = 0,508 * 3,14/6 * 17.111 = 4.549 \text{ Kg/ml}$$

## 7- VERIFICHE DELLO SPESSORE DEL TUBO DI PROTEZIONE

Le verifiche verranno effettuate secondo quanto disposto dalla normativa vigente, in particolare facendo riferimento alla tabella seguente:

Formule per il calcolo dei tubi di protezione interrati

	A	B	C	D	E
	PESO PROPRIO	CARICO RIPARTITO SUPERIORE	CARICO RIPARTITO LATERALE	CARICO TRIANGOLARE LATERALE	REAZIONE RADIALE COSTANTE SETTORE 24° = 60°
SCHEMA					
SEZIONE VERTICALE SUPERIORE	$M = \frac{1}{2} \gamma sr^2$ $N = -\frac{1}{2} \gamma sr$	$M = (\frac{4}{3\pi} - \frac{1}{8}) pr^2 = 0.29941 pr^2$ $N = -\frac{1}{3\pi} pr = -0.10610 pr$	$M = -\frac{1}{4} qr^2$ $N = qr$	$M = -\frac{5}{48} zr^2 = -0.10417 zr^2$ $N = \frac{5}{16} zr = 0.31250 zr$	$(Q = \text{reazione totale})$ $M = -0.0073038 Qr$ $N = 0.014817 Q$
SEZIONE ORIZZONTALE MEDIANA	$M = -\frac{\pi-2}{2} \gamma sr^2 = -0.57080 \gamma sr^2$ $N = \frac{\pi}{2} \gamma sr = 1.57080 \gamma sr$	$M = (\frac{1}{\pi} - \frac{5}{8}) pr^2 = -0.30669 pr^2$ $N = pr$	$M = \frac{1}{4} qr^2$ $N = 0$	$M = \frac{1}{8} zr^2 = 0.125 zr^2$ $N = 0$	$M = 0.0075118 Qr$ $N = 0$
SEZIONE VERTICALE INFERIORE	$M = \frac{3}{2} \gamma sr^2$ $N = \frac{1}{2} \gamma sr$	$M = (\frac{2}{3\pi} + \frac{3}{8}) pr^2 = 0.58721 pr^2$ $N = \frac{1}{3\pi} pr = 0.10610 pr$	$M = -\frac{1}{4} qr^2$ $N = qr$	$M = -\frac{7}{48} zr^2 = -0.14583 zr^2$ $N = \frac{11}{16} zr = 0.68750 zr$	$M = -0.11165 Qr$ $N = 0.11916 Q$

M - Momento flettente

N - Sforzo assiale

p - Carico uniformemente ripartito, dovuto ai carichi mobili ed al peso della massiccata

q - Pressione uniforme dovuta alle spinte orizzontali

z - Pressione variabile dovuta alle spinte orizzontali

r - Raggio medio della tubazione

s - Spessore della tubazione

$\gamma$  - Peso specifico del materiale costituente la tubazione

La sezione di tubo di protezione verrà verificata in tre (03) sezioni radiali diverse:

- Verifica in corrispondenza della sezione verticale superiore;
- Verifica in corrispondenza della sezione orizzontale mediana;
- Verifica della sezione verticale inferiore.

## 7.1. VERIFICA DELLA SEZIONE VERTICALE SUPERIORE

### **Condizione A) – Peso proprio**

$$M = 1/2 * \gamma * s * r^2$$

$$N = - 1/2 * \gamma * s * r$$

Nel caso in esame si ha:

$$s = 12,50 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$$

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$M = 0,5 * 7850 * 0,0125 * (0,2595)^2 = 3,30 \text{ Kgm}$$

$$N = -0,5 * 7850 * 0,0125 * 0,2595 = - 12,73 \text{ Kg}$$

### **Condizione B) – Carico ripartito superiore**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$p = 16.860 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = 0,29941 * p * r^2 = 0,29941 * 16.860 * (0,2595)^2 = 339,94 \text{ Kgm}$$

$$N = -0,10610 * p * r = -0,10610 * 16.860 * 0,2595 = - 464,21 \text{ Kg}$$

### **Condizione C) – Carico ripartito laterale**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$q = 5620,10 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = -1/4 * q * r^2 = - 94,61 \text{ Kgm}$$

$$N = q * r = 5620,10 * 0,2595 = 1.458 \text{ Kg}$$

### **Condizione D) – Carico triangolare laterale**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$z = 313,27 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = -5/48 * z * r^2 = - 0,10417 * z * r^2 = - 2,20 \text{ Kgm}$$

$$N = 5/16 * z * r = 0,31250 * z * r = 25,40 \text{ Kg}$$

### **Condizione E) – Reazione radiale costante**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$Q_r = 4549 \text{ Kg/ml}$$

$$Q = 17111 \text{ Kg}$$

$$M = -0,0073038 * Q_r = - 33,22 \text{ Kgm} \approx -33 \text{ Kgm}$$

$$N = 0,014817 * Q = 253,53 \text{ Kg} \approx 254 \text{ Kg}$$

## 7.2. VERIFICA DELLA SEZIONE ORIZZONTALE MEDIANA

### **Condizione A) – Peso proprio**

$$M = -[(3,14 - 2)/2] * \gamma_t * s * r^2$$

$$N = - 3,14/2 * \gamma_t * s * r$$

Nel caso in esame si ha:

$$s = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$$

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$M = - 0,57080 * \gamma_t * s * r^2 = - 0,57 * 7850 * 0,0125 * (0,2595)^2 = - 3,77 \text{ Kgm}$$

$$N = 1,57080 * 7850 * 0,0125 * 0,2595 = 40,00 \text{ Kg}$$

### **Condizione B) – Carico ripartito superiore**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$p = 16860 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = - 0,30669 * 16860 * (0,2595)^2 = - 348,20 \text{ Kgm}$$

$$N = p * r = 16860 * 0,2595 = 4.375 \text{ Kg}$$

### **Condizione C) – Carico ripartito laterale**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$q = 5620,10 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = 1/4 * q * r^2 = 94,61 \text{ Kgm}$$

$$N = 0 \text{ Kg}$$

### **Condizione D) – Carico triangolare laterale**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$z = 313,27 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = 1/8 * z * r^2 = 0,125 * z * r^2 = 2,64 \text{ Kgm}$$

$$N = 0 \text{ Kg}$$

### **Condizione E) – Reazione radiale costante**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$Q_r = 4549 \text{ Kg/ml}$$

$$Q = 17111 \text{ Kg}$$

$$M = 0,0075118 * Q_r = 34,17 \text{ Kgm}$$

$$N = 0 \text{ Kg}$$

### 7.3. VERIFICA DELLA SEZIONE VERTICALE INFERIORE

#### **Condizione A) – Peso proprio**

$$M = 3/2 * \gamma_t * s * r^2$$

$$N = 1/2 * \gamma_t * s * r$$

Nel caso in esame si ha:

$$s = 12,5 \text{ mm} = 0,0125 \text{ m}$$

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$M = 1,5 * \gamma_t * s * r^2 = 1,5 * 7850 * 0,0125 * (0,2595)^2 = 9,91 \text{ Kgm}$$

$$N = 0,5 * 7850 * 0,0125 * 0,2595 = 12,73 \text{ Kg}$$

#### **Condizione B) – Carico ripartito superiore**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$p = 16860 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = (2/3 \pi + 3/8) * p * r^2 = 0,58721 * 16860 * (0,2595)^2 = 666,69 \text{ Kgm}$$

$$N = 1/3 \pi * p * r = 0,10610 * 16860 * 0,2595 = 464,21 \text{ Kg}$$

#### **Condizione C) – Carico ripartito laterale**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$q = 5620,10 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = -1/4 * q * r^2 = -94,61 \text{ Kgm}$$

$$N = q * r = 1.458 \text{ Kg}$$

#### **Condizione D) – Carico triangolare laterale**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$z = 313,27 \text{ Kg/m}^2$$

$$M = -7/48 * z * r^2 = -0,14583 * 313,27 * (0,2595)^2 = -3,08 \text{ Kgm}$$

$$N = 11/16 * z * r = 55,89 \text{ Kg}$$

#### **Condizione E) – Reazione radiale costante**

$$r = \text{raggio medio della tubazione} \quad r = (500 + 12,50)/2 = 0,2595 \text{ m}$$

$$Q_r = 4549 \text{ Kg/ml}$$

$$Q = 17111 \text{ Kg}$$

$$M = -0,11165 * Q_r = -507,90 \text{ Kgm}$$

$$N = 0,11916 * Q = 2.038,95 \text{ Kg}$$

I risultati sono riassunti nella tabella seguente:

TIPO DI CARICO	SEZIONE VERTICALE SUPERIORE		SEZIONE ORIZZONTALE MEDIANA		SEZIONE VERTICALE INFERIORE	
	M [Kgm/ml]	N [kg/ml]	M [Kgm/ml]	N [kg/ml]	M [Kgm/ml]	N [kg/ml]
Peso proprio	3,30	-12,73	-3,77	40,00	9,91	12,73
Carico ripartito superiore	339,94	-464,21	-348,20	4.375,00	666,69	464,21
Carico ripartito laterale	-94,61	1.458,00	94,61	0,00	-94,61	1458,00
Carico triangolare laterale	-2,20	25,40	2,64	0,00	-3,08	55,89
Reazione radiale costante	-33,00	254,00	34,17	0,00	-507,90	2038,95
<b>TOTALE</b>	<b>213,43</b>	<b>1.260,46</b>	<b>-220,55</b>	<b>4.415,00</b>	<b>71,01</b>	<b>4.029,65</b>

Verificando le sezioni a pressoflessione si ha:

### **Sezione verticale superiore**

$$\sigma_{acc} = M/W_r + N/A_r = 21.343/26,04 + 1.260,46/125 = 819,62 + 10,08 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 829,70 \text{ Kg/cm}^2$$

<  $\sigma_{amm} = 1\,375 \text{ Kg/cm}^2$  **Sezione verificata**

### **Sezione orizzontale mediana**

$$\sigma_{acc} = M/W_r + N/A_r = 22.055/26,04 + 4.415/125 = 846,97 + 35,32 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 882,29 \text{ Kg/cm}^2$$

<  $\sigma_{amm} = 1\,375 \text{ Kg/cm}^2$  **Sezione verificata**

### **Sezione verticale inferiore**

$$\sigma_{acc} = M/W_r + N/A_r = 7101/26,04 + 4.029,65/125 = 272,70 + 32,24 \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = 304,94 \text{ Kg/cm}^2$$

<  $\sigma_{amm} = 1\,375 \text{ Kg/cm}^2$  **Sezione verificata**

## **8 - SMALTIMENTO DELLA PORTATA IN CASO DI ROTTURA DELLA CONDOTTA (punto 4.4.3 e 4.4.8 D.M. del 04/04/2014)**

In caso di rottura della condotta in corrispondenza dell'attraversamento ferroviario si prevede di smaltire la portata tramite le condotte di scarico dei pozzetti realizzate con condotte in PVC DN200.

È chiaro che la portata che potrà defluire da una rottura della condotta dipende dal carico idraulico, dalle perdite di carico in corrispondenza della bocca di efflusso, dalle perdite di carico lungo il tubo guaina e nel pozzetto di scarico.

Trascurando questi ultimi fattori si verifica la capacità di efflusso del tubo guaina della portata smaltibile dall'intercapedine tra il tubo guaina e la condotta.

### ***Tubo guaina (DN 500 in acciaio)***

Di = 0,4830 m                      diametro interno  
Stg = 0,183 m<sup>2</sup>                      area liquida del tubo guaina

### ***Condotta (DN 355 in PEAD)***

De = 0,355 m                      diametro esterno della condotta (PEAD DN355)  
Sc = 0,099 m<sup>2</sup>                      area occupata dalla condotta (PEAD DN355)  
sp = 0,0322 m                      spessore condotta (PEAD DN355)  
Di = 0,2906 m                      diametro interno della condotta (PEAD DN355)  
Sic = 0,066 m<sup>2</sup>                      area liquida della condotta (PEAD DN355)

### ***Sezione corona circolare***

Seff = Stg – Sic = 0,117 m<sup>2</sup>

L'area interna della condotta irrigua pari a  $\pi (Di)^2/4 = 0,066$  risulta essere minore dell'area della corona circolare libera pari a 0,117 m<sup>2</sup> ed è quindi in grado di smaltire la portata massima di progetto in caso di rottura della condotta irrigua.

## **9 – FASI DI REALIZZAZIONE E TEMPISTICHE PRESUNTE**

L'intervento in oggetto è composto dalle seguenti fasi:

- 1 - scavo realizzazione buca di spinta (5 giorni di lavoro presunti)
- 2 - installazione macchinario (3 giorni di lavoro presunti)
- 3 - scavo realizzazione buca di arrivo (3 giorni di lavoro presunti)
- 4 - infissione tubo-pead (2 giorni di lavoro presunti)
- 5 - infilaggio tubo-pead (1 giorni di lavoro presunti)
- 6 - realizzazione pozzetti (4 giorni di lavoro presunti)
- 7 - opere di finitura (2 giorni di lavoro presunti)
- 8 – collaudo (2 giorni di lavoro presunti)

## 10 DIMENSIONAMENTO E VERIFICHE DELLA CONDOTTA PRIMARIA

### 10.1 Introduzione

Il dimensionamento della condotta primaria è quello disposto dal punto 4.3 del D.M. 04/2014 n°137 relativo alle “Norme tecniche per gli attraversamenti e per i parallelismi di condotte e canali convoglianti liquidi e gas con ferrovie ed altre linee di trasporto”.

La rete di distribuzione si snoda formando un anello principale in PEAD DN 355 e ghisa DN 400, dal quale si staccano le linee in PEAD DN 315, PEAD DN 250, PEAD 225, PEAD 160 della quale fa parte il tratto di condotta interessato dall’attraversamento ferroviario.

Il tratto in oggetto si trova su una linea di distribuzione DN 355 a 3.910 m dalla centrale di pompaggio.

### 10.2 Calcolo delle pressioni massime

#### 10.2.a regime di moto permanente

Da quanto più approfonditamente si può desumere dalla relazione tecnica allegata, il dimensionamento della condotta è stato effettuato nell’ipotesi di moto permanente, secondo il funzionamento delle reti in pressione.

La pressione di esercizio della condotta sarà pari a 4 atm; il funzionamento della rete in moto permanente ed uniforme è stato simulato ipotizzando tre diversi casi di funzionamento. I calcoli effettuati (vedere relazione tecnica di progetto allegata) il tratto di condotta interessato dall’attraversamento ferroviario, identificabile come RAMO n. 20 Q; ipotesi A, ip. B, ip. C, (tra i NODI Z13 P e Z14 P) del distretto Boncellino.

Dai calcoli si ricava:

prevalenza delle pompe (nodo 1)	80 m
Lunghezza condotta (centrale – attraversamento)	3.910 m

#### **Caso A:**

Portata nel tratto dell’attraversamento	79,69 l/s
Altezza piezometrica nel tratto dell’attraversamento:	(media tra 68,41 m e 68,72 m) =
<b>68,57 m</b>	

#### **Caso B:**

Portata nel tratto dell’attraversamento	94,50 l/s
Altezza piezometrica nel tratto dell’attraversamento:	(media tra 75,22 m e 75,55 m) =
<b>75,39 m</b>	

#### **Caso C:**

Portata nel tratto dell’attraversamento	19,09 l/s
Altezza piezometrica nel tratto dell’attraversamento:	(media tra 71,91 m e 71,89 m) =
<b>71,90 m</b>	

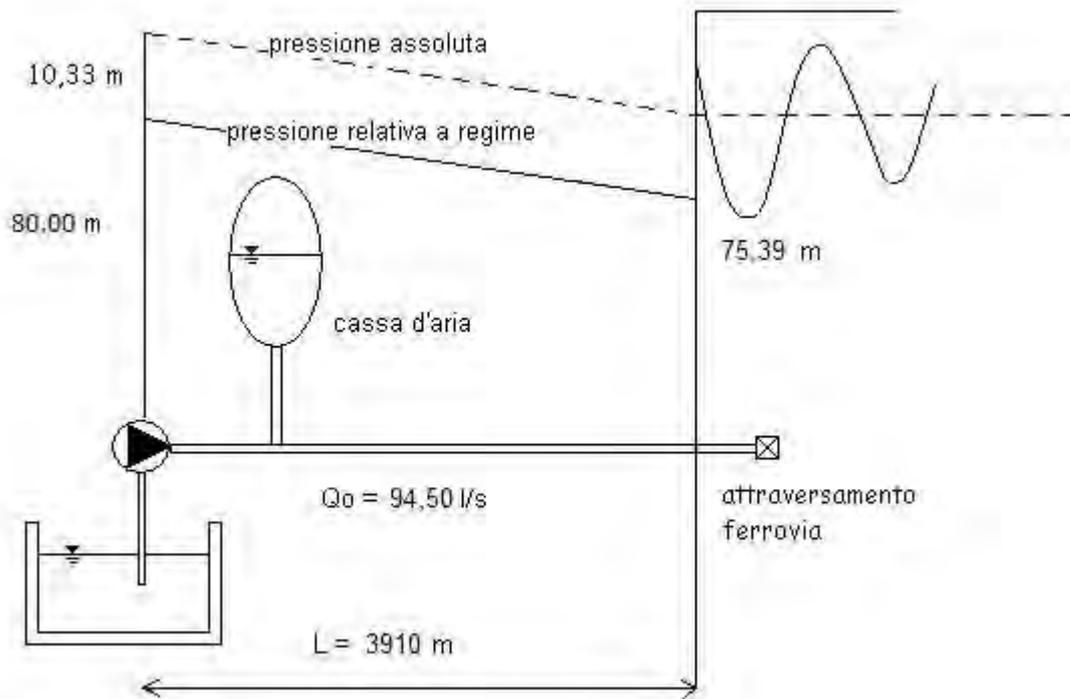
La pressione massima di esercizio all’altezza dell’attraversamento risulta, nell’ipotesi di funzionamento B: 75,39 m pari a 7,30 atm.

#### 10.2.b regime di moto vario - verifica di colpo d’ariete

Per la determinazione della massima pressione in condotta in regime di moto vario si è considerata la peggior condizione di funzionamento simulando le sovrappressioni dovute al colpo d’ariete in caso di arresto brusco e contemporaneo delle pompe ed in caso di chiusura degli organi di intercettazione a valle.

In questa sede appare opportuno e prudentiale trascurare il contributo del sistema di protezione del colpo d’ariete dato dalla presenza di due casse d’aria a protezione della condotta (volume complessivo 10.000 litri, complete di valvole speciali atte ad evitarne lo svuotamento al mancare della forza motrice per lungo tempo) inoltre nel calcolo non si è tenuto conto dell’ulteriore attenuazione al fenomeno del colpo d’ariete garantito dalla posa in opera di sfiati automatici a triplice funzione lungo tutto il tracciato della condotta.

## Profilo idraulico – schema di progetto



La sovrappressione massima, data dall'arresto brusco delle pompe, misurata in m di colonna d'acqua, è data dalla formula di Allievi:

$$\Delta h = \frac{cV_0}{g}$$

nella quale

$$c = \frac{\sqrt{\varepsilon / \rho}}{\sqrt{1 + \frac{\varepsilon D}{E s}}}$$

dove:

- $c$  = celerità di propagazione delle perturbazioni in m/s
- $g$  = accelerazione di gravità  $m/s^2$
- $V_0$  = velocità dell'acqua prima della chiusura in m/s
- $\varepsilon$  = modulo di elasticità di volume dell'acqua
- $E$  = modulo di elasticità del PEAD in MPa
- $D$  = diametro del tubo in m
- $s$  = spessore del tubo in m

Pead Attraversamento Castel Bolognese - Ravenna al Km 22+174			
E	900 Mpa		
epsylon	2000 Mpa	epsylon/E	2,222222
	1 Mpa = 1,00E+06 Kg/(s <sup>2</sup> m)		
epsylon	2,00E+09 Kg/(s <sup>2</sup> m)		
ro =	1000 kg/m <sup>3</sup>	epsylon/ro	2,00E+06 m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
D	0,355 m	D/s	11,02484
s	0,0322 m		
c =	<b>280,05791</b>		
	Q=	0,09 m <sup>3</sup> /s	94,5 l/s
	A=	0,10 m <sup>2</sup>	
	v=	0,96 m/s	
	Dh = cV/g =	<b>27,27</b> m	
	P esercizio	75,39 m	
	P max	102,66 m	

la sovrappressione massima in condotta all'altezza dell'attraversamento vale:

Delta h = 27,27 m

**p<sub>max</sub> = 75,39 + 27,27 = 102,66 m c.a. (9,94 atm)**

Per le sovrappressioni dovute al brusco azionamento degli organi di intercettazione si può invece considerare, vista la notevole differenza di diametro tra l'anello principale e la linea secondaria, che il nodo di stacco dall'anello sia equivalente al serbatoio statico di monte per l'applicazione della formula di Allievi-Michaud:

$$(Y_{\max} - Y_0) = 2LV_0/gT_c$$

dove

L = 3.910 m                      lunghezza condotta (centrale-attraversamento ferroviario)

t<sub>c</sub> =                                  tempo di chiusura

c = 280 m/sec                      celerità dell'onda di propagazione

t = 2 L / c = 2x3.910/280 = 27,92 sec

Ipotizzando tempi di manovra multipli di t si ha:

t<sub>c</sub> = 1x t =                      27.92 sec                      ΔH1 = 27,27 m

t<sub>c</sub> = 2x t =                      55.84 sec                      ΔH1 = 13,64 m

t<sub>c</sub> = 3x t =                      83.76 sec                      ΔH1 = 9,09 m

Le manovre degli organi di intercettazione (chiusura di saracinesche) non potranno realisticamente avvenire con tempi inferiori ai 30 – 40 secondi, per cui è cautelativo ipotizzare questo tempo di manovra per la chiusura completa delle valvole. In tale ipotesi la massima pressione in condotta all'altezza dell'attraversamento sarebbe:

**p<sub>max</sub> = 75,39 + 13,64 = 89,03 m (8,62 atm)**

Data la grande distanza del tratto in argomento dalla centrale di pompaggio e poiché non sono stati considerati tutti i dispositivi in campo per l'attenuazione del colpo d'ariete, gli eventi di chiusura di organo di manovra e di arresto brusco delle pompe danno valori simili i sovrappressioni. Sulla base dei calcoli e delle assunzioni preposte, si evince che il carico piezometrico e di conseguenza la pressione lungo tutta la condotta, in condizioni di moto vario, si mantiene, grazie ai dispositivi di protezione, inferiore alla pressione nominale del materiale.

Al fine di limitare l'entità del fenomeno sono state installate sul collettore di mandata delle pompe due casse d'aria del volume di 5 mc (statico). Alla cassa d'aria è collegato un compressore con funzionamento automatico che garantisce il reintegro del volume minimo.

È evidente come i dispositivi anti ariete assumano un ruolo fondamentale al fine di contenere entro i limiti accettabili l'entità delle sovrappressioni e delle depressioni originate dai regimi transitori.

### **10.3 Verifica dello spessore della tubazione**

Come dimostrato nei calcoli idraulici descritti nei precedenti paragrafi, la pressione di esercizio massima a cui il tratto di condotta in oggetto è sottoposto è di 102,66 m c.a. (9,94 atm) (valore che si verifica solo nell'ipotesi remota di mancato funzionamento della cassa d'aria).

Il tubo in Polietilene alta densità PN 16 prodotta a norma della UNI EN 12201-2 da azienda certificata con marchi CISQ -SQP - EQNET in conformità alle norme ISO 9001:2015, saldato testa a testa ed i pezzi speciali di raccordo resistono ad una PFA: (Pressione di Funzionamento Ammissibile: Pressione interna, escluso il colpo d'ariete che un componente può sopportare in tutta sicurezza in modo continuo in regime idraulico permanente) pari a 16 bar valore di molto superiori alla pressione massima calcolata anche nel caso più sfavorevole di arresto brusco delle pompe e mancato funzionamento della cassa d'aria.

Il collaudo della condotta, in base al punto 2.3.6 del D.M. n° 137 del 4/04/2014, verrà effettuato alla pressione di  $1,5 * p_{max} = 1,5 * 9,94 = 14,91$  atm.

### **11 Verifica dei pozzetti alla spinta idrostatica**

I pozzetti saranno tutti prefabbricati, con chiusini carrabili, classe D400, per sostenere carichi di I° categoria, muniti di certificato conforme alla normativa vigente.