



# POTENZIAMENTO DEL SISTEMA ACQUEDOTTISTICO “VERDE”

Riefficientamento dell'opera di presa “sorgente verde” e potenziamento della capacità di trasporto della risorsa idrica

I° stralcio funzionale Fara San Martino – Casoli

CUP: E91B21004050006

PNRR-M2C4-I4.1 – A- 34

## PROGETTO ESECUTIVO

TITOLO: <b>RELAZIONE SULLA VERIFICA STATICA DELLE CONDOTTE</b>	ELAB.N°: <b>R_13</b> <b>rev.1f</b>
---	--

REV.	DATA		eseguito	controllato	approvato
0	15/01/2024	Prima emissione			
1	10/06/2024	Emissione finale dopo RVI			

PROGETTISTA: RTP



Via Carlo Cattaneo, 20 Verona

Ing. Vincenzo D'Angelo

Dott. Geol. Paolo Di Norscia

Dott. Giuseppe Milillo

*consulenza tecnico scientifica*



UNIVERSITÀ  
POLITECNICA  
DELLE MARCHE

prof. Ing. Francesco Fatone

*consulenza archeologica*

Dott. Archeol. Luca Cherstich

A.T.P.



Mandataria



mandante

## sommario

1. PREMESSA.....	3
2. LA NUOVA CONDOTTA.....	3
VERIFICA STATICA DELLE CONDOTTE INTERRATE.....	5
2.1.La sezione di posa .....	5
RELAZIONE DI CALCOLO -.....	8
2.2.tubazioni rigide e flessibili .....	8
2.3.Modalità Di Posa .....	9
2.4.Calcolo Dei Carichi Dovuti Al Rinterro.....	10
Posa in trincea stretta.....	10
Posa in trincea larga .....	11
2.5.AZIONE DEI SOVRACCARICHI DINAMICI VEICOLARI .....	12
2.6.CARICO IDROSTATICO DOVUTO ALLA FALDA .....	14
2.7.SOVRACCARICHI DISTRIBUITI (SOVRACCARICO STATICO) .....	14
3. VERIFICA STATICA TUBAZIONI FLESSIBILI.....	16
3.1.VERIFICA ALLA DEFORMAZIONE .....	16
VERIFICA DELL'INSTABILITÀ ALL'EQUILIBRIO ELASTICO .....	18
VERIFICA DELLE SOLLECITAZIONI .....	19
CALCOLO REAZIONE LATERALE DEL TERRENO.....	21
SCHEMA TRINCEA ADOTTATO .....	23
RISULTATI DELLE VERIFICHE.....	24

# POTENZIAMENTO DEL SISTEMA ACQUEDOTTISTICO "VERDE"

Riefficientamento dell'opera di presa "Sorgente Verde"  
e potenziamento della  
capacità di trasporto della risorsa idrica

I° stralcio funzionale Fara San Martino – Casoli

## 1. PREMESSA

---

La presente relazione si riferisce al progetto definitivo per l'intervento di "Riefficientamento dell'opera di presa "sorgente verde" e potenziamento della capacità di trasporto della risorsa idrica – 1° stralcio Funzionale Fara San Martino – Casoli". Le opere contenute nel presente I stralcio 'Fara San Martino - Casoli', insieme al II stralcio funzionale 'Casoli - Scerni' ed al III stralcio funzionale 'Potabilizzatore e interconnessioni' si inseriscono nell'ambito degli interventi relativi al Potenziamento del sistema acquedottistico 'Verde' finanziati dal PNRR.

La condotta per la quasi totalità del percorso verrà installata in una trincea scavata appositamente; il sedime di posa prevede tratti sotto-strada e tratti in campagna.

La verifica di stabilità della condotta interrata sottoposta i carichi esterni, eseguita secondo la norma UNI 7517 anche alla condizione limite di instabilità elastica (buckling), ha evidenziato la stabilità delle tubazioni nelle condizioni

di posa previste in progetto con un ampio margine di sicurezza, sia allo stato limite di esercizio (deformazioni) sia allo stato limite ultimo (sollecitazione – instabilità elastica).

## 2. LA NUOVA CONDOTTA

---

I lavori previsti in questo stralcio funzionale consistono nella posa in opera di una condotta per adduzione idrica, e nella realizzazione delle opere accessorie (pozzetti e camerette di connessione, dispositivi di regolazione e controllo). La nuova linea

adduttrice affianca il sistema idrico esistente costituito da una condotta DN 750 e DN 1000.

Il tracciato del nuovo acquedotto si sviluppa per la massima parte su strada (statale SS94, provinciale SP95, comunale Fara S.M. e Casoli) e per una parte minore in campagna. I Comuni interessati sono Fara San Martino e Casoli e marginalmente Civitella Messer Raimondo, tutti nella provincia di Chieti.

La condotta adduttrice si sviluppa per una lunghezza di 8453,30m ed è costituita da una tubazione interrata in ghisa sferoidale DN 500.

Secondo schema idraulico previsto percorrendo l'asse della condotta si individuano due tratti caratteristici:

- un primo tratto di circa 8117,30m denominato "*nuova adduttrice DN500*" in ghisa sferoidale diametro DN500mm;
- un tratto finale di circa 276,00m denominato "*condotta di restituzione*", realizzato sempre con un tubo in ghisa sferoidale DN500mm.

Tutta la condotta sarà interrata e verrà posata in trincea ad una profondità media variabile, con una distanza dell'estradosso del tubo dal piano campagna pari a:

- 1,25m dal p.c. nei tratti sotto-strada;
- 1,00m dal p.c. nei tratti in campagna, con un breve tratto a 4,00m;

Lungo il percorso la tubazione attraversa alcuni corpi idrici, che saranno superati in sopra-alveo (fosso al torrente Verde, di due fossi minori, del Fiume Aventino). Il più importante di questi attraversamenti è quello del fiume Aventino che sarà superato con un manufatto in appoggio al ponte stradale esistente.

La nuova condotta per alcuni tratti del suo percorso sarà installata parallelamente alle condotte esistenti, condividendo il sedime di posa già occupato da queste; per tale motivo la fascia di terreno attualmente occupata dalle condotte DN750 e DN1000, di proprietà dell'Ente Gestore, verrà opportunamente allargata per consentire la posa del nuovo tubo; dove la condotta esce dal parallelismo con i tubi già in opera, il tracciato insisterà su una nuova fascia di terreno. Sia l'allargamento della attuale fascia di proprietà della S.A.S.I. sia la fascia di terreno di nuova acquisizione saranno oggetto una procedura espropriativa. Come si evince dalle planimetrie di dettaglio (G.12) gran parte del tracciato della condotta percorre strade esistenti che vanno dalla strada Statale 84 alla strada provinciale 95 e 263, percorrendo inoltre strade comunali interpoderali.

## VERIFICA STATICA DELLE CONDOTTE INTERRATE

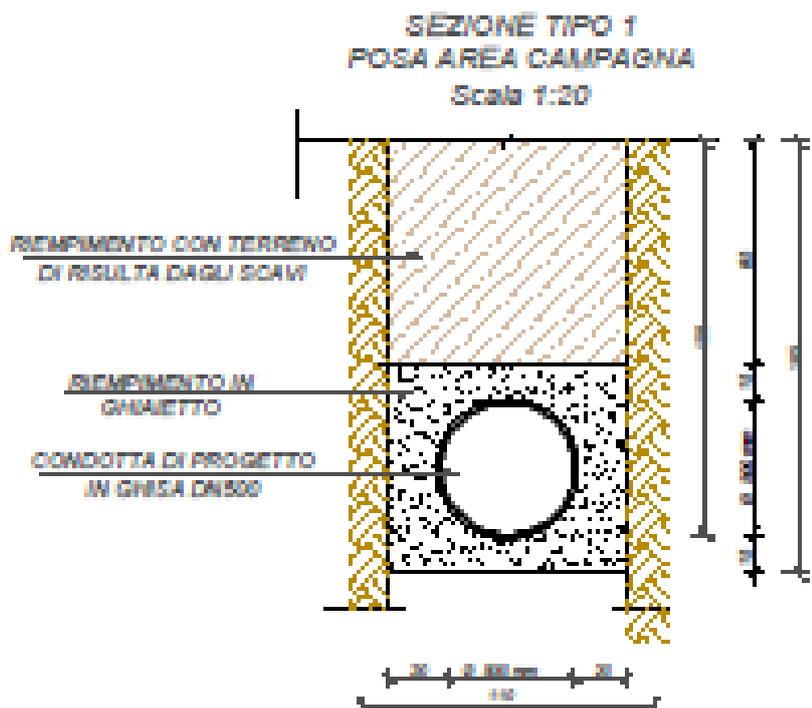
---

### 2.1. La sezione di posa

Il progetto prevede la posa a scavo aperto in trincea secondo sezioni di posa diverse in relazione alla zona di installazione di tubi.

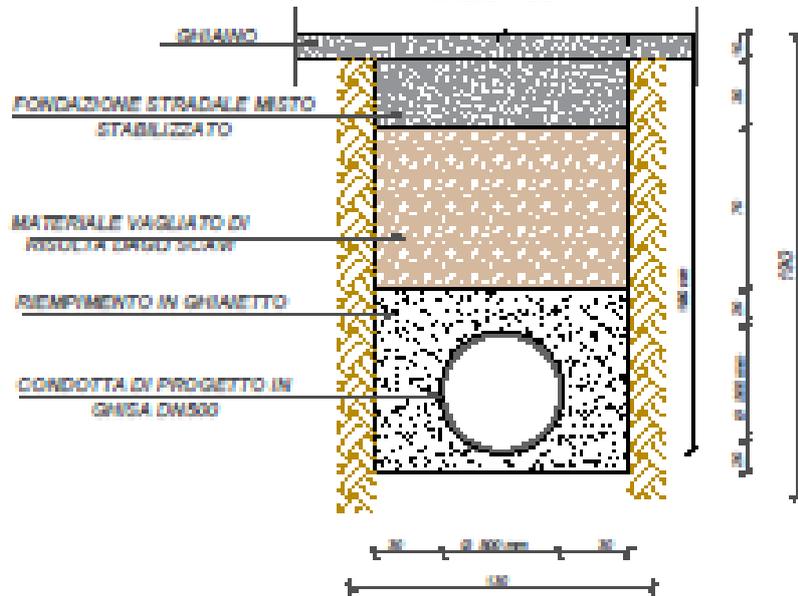
Le sezioni rispondenti alle caratteristiche richieste dagli Enti competenti sui tratti stradali, sono state dimensionate in rispondenza alla norma EN 1610. Le caratteristiche delle sezioni e i materiali impiegati nel rinfianco/rinterro sono tali da garantire la stabilità strutturale dei tubi.

#### Zona di campagna

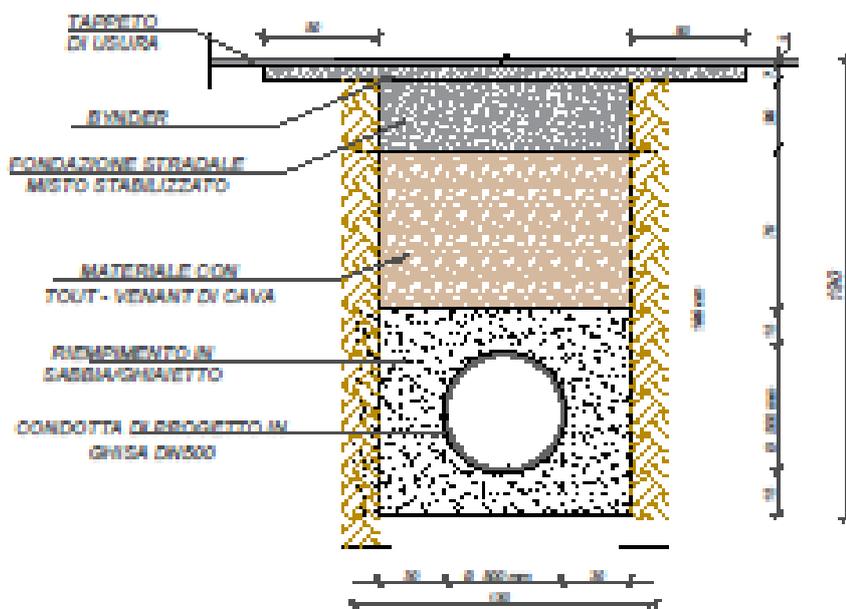


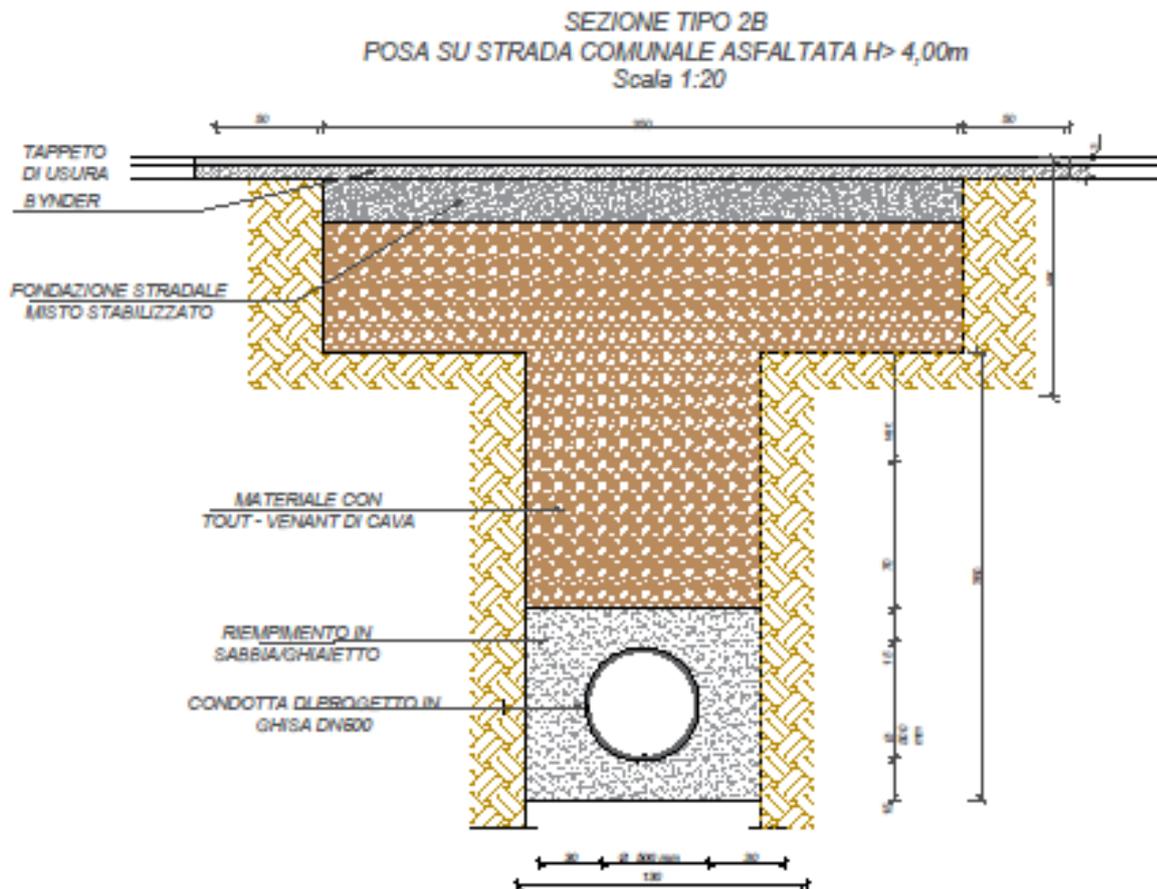
## Strada comunale

SEZIONE TIPO 2  
POSA SU STRADA COMUNALE STERRATA  
Scala 1:20

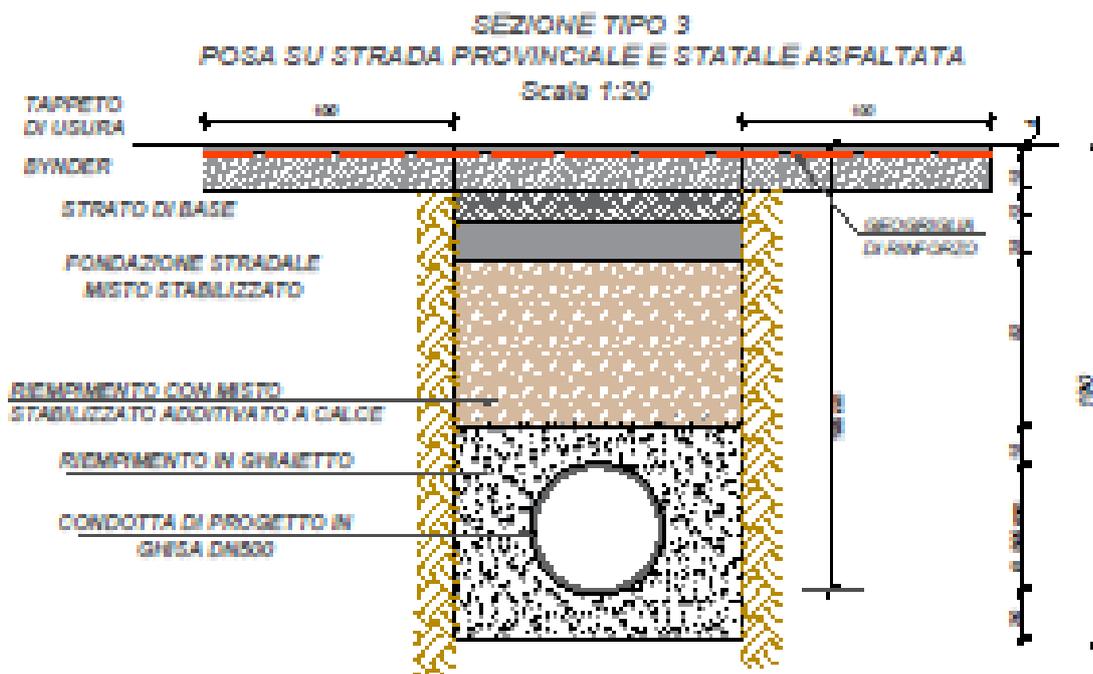


SEZIONE TIPO 2A  
POSA SU STRADA COMUNALE ASFALTATA  
Scala 1:20





Strada provinciale e Statale asfaltata



Nelle condizioni di posa sotto strada è prevista una altezza di ricopertura  $h_1 = 1,25\text{m}$  mentre per le zone di campagna l'altezza di ricopertura è  $h_1 = 1,00$ . Come si evince dalle figure in tutte le sezioni di posa è previsto un rinfiacco sabbia /ghiaietto mentre il rinterro varia in relazione alla zona di installazione.

## RELAZIONE DI CALCOLO -

---

### 2.2. tubazioni rigide e flessibili

---

La verifica statica di una tubazione consiste nell'accertare che i carichi agenti sulla struttura provochino tensioni e deformazioni ammissibili.

Le sollecitazioni su un tubo interrato dipendono dall'interazione tubo-terreno, fortemente legata alla deformabilità relativa dei due elementi: se il tubo si deforma di più del terreno che lo circonda, sarà sollecitato in modo minore poiché deformandosi sensibilmente coinvolge il terreno di rinfiacco a collaborare alla resistenza.

Dalla deformabilità relativa tubo-terreno dipende il comportamento statico della condotta. Emerge, quindi, la convenienza a classificare le tubazioni in base all'elasticità in sito.

Si definisce *coefficiente di elasticità in sito*  $R$  di una tubazione di diametro esterno  $DN$ , di diametro medio  $D_m$  ( $DN-S$ ), di spessore  $S$  e modulo elastico  $E$ , posata in un terreno di modulo elastico  $E_s$ , il numero:

$$R = \frac{SN}{E_t}$$

Dove:

SN: rigidezza circonferenziale della tubazione pari a  $\frac{E \cdot I}{D_m^3}$

I: momento d'inerzia trasversale della striscia unitaria di parete del tubo rispetto all'asse neutro della parete strutturalmente resistente pari a  $\frac{s^3}{12}$

La tubazione interrata è flessibile (o deformabile) se risulta:

$$R < \frac{1}{12}$$

Rigida invece:

$$R \geq \frac{1}{12}$$

In questa ottica, le tubazioni per il trasporto di fluidi si suddividono in tre categorie:

- tubazioni rigide (cemento armato, gres, fibrocemento);

- tubazioni semiflessibili (acciaio, ghisa sferoidale), quelle che in relazione alle caratteristiche del terreno, a seconda dei casi, possono avere comportamento rigido o flessibile;
- tubazioni flessibili (PE, PVC, PP, PRFV)

Le tubazioni rigide sotto l'azione dei carichi esterni si fessurano senza che la deformazione della sezione possa assumere caratteri significativi.

Viceversa, le tubazioni flessibili si deformano senza il raggiungimento di uno stato limite di fessurazione.

Ciò comporta che la verifica di stabilità sia eseguita in maniera del tutto diversa a seconda che si tratti di tubazioni rigide o di tubazioni flessibili.

- Per le tubazioni flessibili

le verifiche di stabilità riguardano:

1. *calcolo e verifica della deformazione diametrale (ovalizzazione) a lungo termine*
2. *calcolo e verifica di stabilità all'equilibrio elastico*
3. *calcolo e verifica degli sforzi massimi di trazione e compressione nella sezione*

- Per le tubazioni rigide:

la verifica di stabilità riguarda lo *stato limite ultimo di rottura*.

#### DETERMINAZIONE DEI CARICHI AGENTI SULLA TUBAZIONE

La verifica statica di una tubazione interrata viene effettuata calcolando:

- i carichi permanenti che gravano sulla tubazione;
- i carichi accidentali che gravano sulla tubazione;
- il carico idraulico indotto dalla presenza della falda;
- le reazioni laterali del terreno.

I carichi permanenti cui è sottoposta una tubazione interrata dipendono per lo più dall'azione del rinterro mentre i carichi accidentali sono da attribuirsi alla presenza di traffico.

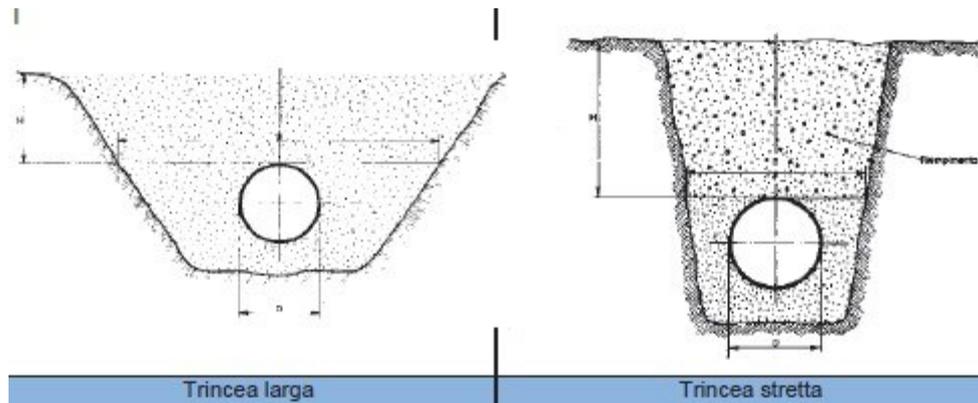
### 2.3. Modalità Di Posa

---

In conformità a quanto proposto dalla normativa UNI 7517 occorre distinguere fra:

- posa in trincea stretta;
- posa in trincea larga.

Nella figura successiva se ne mostra una rappresentazione schematica.



## 2.4. Calcolo Dei Carichi Dovuti Al Rinterro

---

Nella determinazione del carico permanente che sollecita una condotta interrata un ruolo importante è dato dall'azione del rinterro. Tra le diverse metodologie utilizzate nella comune prassi ingegneristica si è scelto di utilizzare il metodo di Marston Spangler – Iowa State College Engineering Experiment Station [Da Deppo, 2009 Fognature]

### Posa in trincea stretta

---

La norma UNI considera che una condotta sia posata in trincea stretta quando sia soddisfatta una delle seguenti condizioni:

1.  $B \leq 2D$  con  $H \geq 1.5B$ ;
2.  $2D \leq B \leq 3D$  con  $H \geq 3.5B$

In cui  $B$  e  $H$  indicano la larghezza e l'altezza dall'estradosso della tubazione come riportato nella precedente figura.

Nella posa in trincea stretta, il peso del rinterro che grava sull'estradosso della tubazione  $Q_{st}$  è minore del peso del relativo volume, per effetto dell'attrito presente tra il terreno indisturbato posto ai lati della trincea ed il terreno di rinterro. Tale azione è funzione del peso specifico, dell'angolo di attrito del terreno indisturbato e del coefficiente d'attrito con il rinterro.

Il valore di carico  $Q_{st}$  del rinterro è calcolabile mediante la relazione:

$$Q_{st} = C_1 \gamma_1 B D N$$

in cui:

- $Q_{st}$  indica il carico dovuto al rinterro [kN/m];
- $B$  indica la larghezza della trincea [m];

- $DN$  il diametro esterno della tubazione fognaria [m];
- $\gamma_t$  indica il peso specifico del terreno di rinterro [kN/m<sup>3</sup>];
- $C_t$  indica il coefficiente di Marston [-].

Il coefficiente di Marston si valuta mediante la relazione:

$$C_t = \frac{1 - \exp\left(-2k_a\mu\frac{H}{B}\right)}{2k_a f}$$

in cui:

- $C_t$  coefficiente adimensionale di Marston [-];
- $k_a = \operatorname{tg}^2\left(45 - \frac{\varphi}{2}\right)$  coefficiente di spinta attiva con  $\varphi$  angolo d'attrito del terreno di rinterro [°];
- $f$  coefficiente di attrito tra terreno indisturbato e rinterro pari a  $\operatorname{tg}\varphi$  [°];
- $H$  altezza del terreno di rinterro valutata dall'estradosso della tubazione [m];
- $B$  larghezza della trincea [m].

Nel caso di trincea stretta, al carico  $Q_{st}$  corrisponde una pressione verticale  $q_{st}$  valutabile con la relazione:

$$q_{st} = \frac{2Q_{st}}{\sqrt{2DN}}$$

in cui:

- $q_{st}$  pressione verticale agente sulla parte superiore del tubo per una lunghezza pari alla corda compresa in un angolo al centro di 90°;
- $DN$  il diametro esterno della tubazione [m];
- $Q_{st}$  indica il sovraccarico indotto dal rinterro [kN/m]

## Posa in trincea larga

Nel caso in cui le condizioni elencate nel precedente paragrafo non siano rispettate la posa si definisce in trincea larga.

In questo caso il carico  $Q_{st}$  generato dal peso del terreno sovrastante l'estradosso della tubazione è pari a:

$$Q_{st} = \gamma_t DNH$$

in cui:

- $Q_{st}$  indica il sovraccarico indotto dal rinterro [kN/m];
- DN il diametro esterno della tubazione [m];
- H altezza del terreno di rinterro valutata dall'estradosso della tubazione [m].

al carico  $Q_{st}$  corrisponde una pressione verticale  $q_{st}$  valutabile mediante la relazione:

$$q_{st} = \frac{Q_{st}}{0.85DN}$$

In cui  $q_{st}$  indica la pressione verticale agente sulla parte superiore del tubo per una lunghezza pari alla corda compresa in un angolo al centro pari a circa 130°;

- DN il diametro esterno della tubazione fognaria[m];
- $Q_{st}$  indica il sovraccarico indotto dal rinterro [kN/m]

### 2.2.3 - Caratteristiche dei terreni

Nella successiva tabella sono elencate le caratteristiche geotecniche dei terreni da assumere per la definizione del carico indotto dal rinterro:

Tipo di terreno	Peso specifico $\gamma_t$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Peso immerso $\gamma'$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Angolo di attrito interno $\phi$ [°]
Argilla fangosa	20	16.9	20
Argilla sabbiosa	18	15.9	14
Argilla umida comune	20	16.4	12
Fango con polvere di roccia	18	16.9	25
Loess	21	15.9	18
Marna	21	16.9	22
Misto di cava di ghiaia e ciottoli	20	16.8	37
Misto di cava di sabbia e ghiaia	20	16.5	33
Sabbia argillosa	18	15.9	15
Sabbia secca	15	15.9	31
Sabbia umida	17	16.4	34
Terra secca	17	15.5	14
Terra umida	20	16.0	25
Terreno misto compatto	20	16.4	33
Terreno misto sciolto	18	15.9	15
Terreno paludoso	17	9.9	12
Terreno sabbioso	19	15.8	30

## 2.5. AZIONE DEI SOVRACCARICHI DINAMICI VEICOLARI

---

Sul terreno sovrastante la tubazione interrata oltre al rinterro possono agire altri carichi.

Questi si suddividono in dinamici, relativi al traffico stradale e/o ferroviario, e statici, associati a corpi posti sul terreno che grava sul tubo.

Per il calcolo del carico veicolare si fa riferimento a quanto espresso dalla normativa DIN 1072 secondo cui il traffico veicolare può essere suddiviso nelle seguenti classi di carico:

Classe	Carico per ruota P (KN)	Tipologia
HT60	100	Traffico pesante
HT45	75	
HT38	62.5	
HT30	50	
HT26	35	
LT12	20	Traffico leggero
LT6	10	
LT3	5	

La pressione dinamica  $\sigma_z$  esercitata dal traffico sul tubo viene valutata adottando le seguenti relazioni:

- $\sigma_z = 0.8743 \frac{P}{H^{1.5194}} \varphi$  valida per traffico stradale pesante (convoglio classe HT) e ferroviario;

- $\sigma_z = 0.5281 \frac{P}{H^{1.0461}} \varphi$  valida per traffico stradale leggero (convoglio classe LT);

in cui:

- $\sigma_z$  pressione dinamica [kN/m<sup>2</sup>];
- $P$  carico per ruota [kN];
- $H$  altezza del terreno valutata dall'estradosso del tubo [m];
- $\varphi$  coefficiente di incremento valutato con la relazione  $\varphi = 1 + 0,3/H$ .

Nota la pressione dinamica è possibile calcolare il carico dinamico che grava su una condotta di diametro esterno  $DN$  applicando la relazione

$$Q_{dim} = \sigma_z DN$$

In cui:

- $\sigma_z$  indica la pressione dinamica [kN/m<sup>2</sup>];
- $DN$  indica il diametro esterno del tubo [m];

#### AZIONE DEL PESO DEL FLUIDO

Si considera come carico aggiuntivo sul tubo anche il peso dell'acqua contenuta al suo interno. Il carico, nell'ipotesi di tubo pieno, si calcola con la relazione

$$Q_a = 7.70D_i^2$$

In cui  $D_i$  indica il diametro interno della tubazione [m].

## 2.6. CARICO IDROSTATICO DOVUTO ALLA FALDA

---

Se nel terreno in cui è posata la tubazione si è in presenza di falda si deve tenere conto della pressione idrostatica che la falda esercita sulla condotta mediante la relazione:

$$Q_{idr} = \gamma_w \left( h + \frac{DN}{2} \right) DN$$

in cui:

- $Q_{idr}$  indica il carico indotto dalla falda [kN/m];
- $DN$  il diametro esterno della condotta [m]
- $\gamma_w$  indica il peso specifico dell'acqua [kN/m<sup>3</sup>];
- $h$  indica l'altezza della falda valutata rispetto l'estradosso delle tubazioni [m].

la pressione esercitata dalla falda  $q_{idr}$  è pari a:

$$q_{idr} = \gamma_w \left( h + \frac{DN}{2} \right) = \frac{Q_{idr}}{DN}$$

Nel caso di presenza di falda il carico del rinterro, per la quota parte interessata dalla falda, deve essere calcolato adottando il relativo peso specifico immerso  $\gamma_t$  tabulato nella precedente tabella.

## 2.7. SOVRACCARICHI DISTRIBUITI (SOVRACCARICO STATICO)

---

Nel caso in cui sul tubo sia gravante un carico  $P_n$  distribuito su una superficie di estensione  $A$  rettangolare di larghezza  $u_1$  e lunghezza  $u_2$  la pressione  $q_s$  che agisce sul tubo si calcola mediante la relazione:

$$q_s = \frac{P_n}{(u_1 + 2H)(u_2 + 2H)}$$

in cui:

- $q_s$  indica la pressione che agisce sul tubo [kN/m<sup>2</sup>]
- $u_1$  indica la larghezza della superficie su cui agisce il carico  $P_n$  [m];
- $u_2$  indica la lunghezza della superficie su cui agisce il carico  $P_n$  [m];
- $H$  indica l'altezza di ricopertura del tubo (altezza del terreno valutata dall'estradosso del tubo) [m];

Nota la pressione, il carico  $P$  si calcola con l'equazione:

$$P = q_s \beta DN$$

in cui:

- P indica il carico che agisce sulla condotta [kN/m];
- $\beta$  è un coefficiente pari a 0.71 per posa in trincea stretta ed a 0.88 per posa in trincea larga;
- DN il diametro esterno della condotta.

### 3. VERIFICA STATICA TUBAZIONI FLESSIBILI

#### 3.1. VERIFICA ALLA DEFORMAZIONE

La deformazione viene calcolata adottando lo schema statico proposto da Spangler secondo cui lo stato di sollecitazione che si produce in una tubazione sottoposta ai carichi indicati nella figura successiva è caratterizzato da una distribuzione parabolica della spinta passiva simmetrica rispetto al diametro orizzontale e applicata a partire dall'angolo a pari a 40° per un'ampiezza di 100 mentre la reazione sul fondo della trincea interessa varie ampiezze [Da Deppo – Fognature 2009]

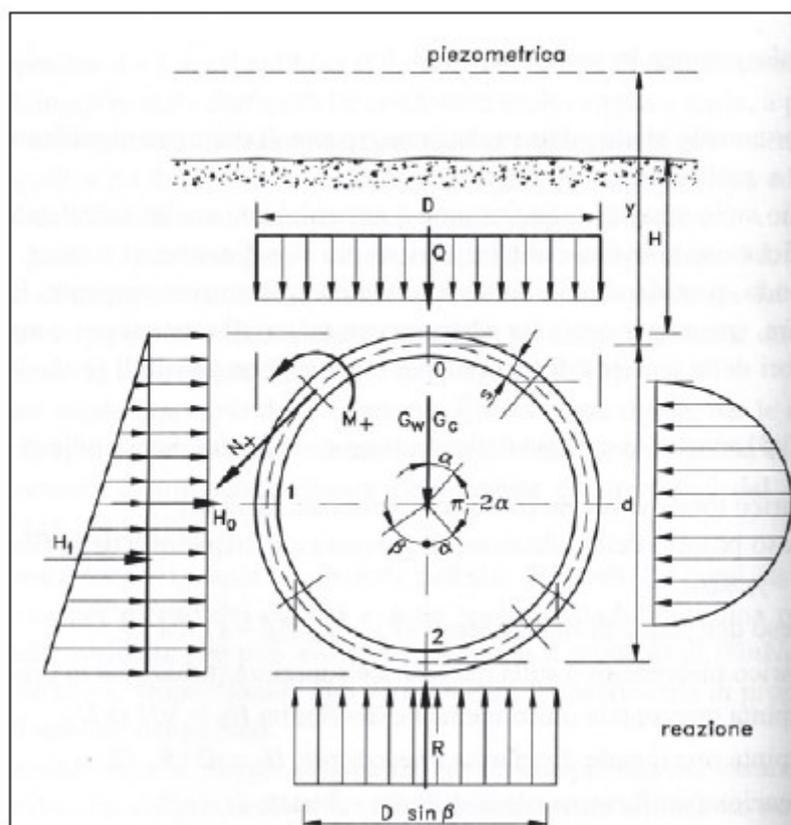


Figura 1 - Schema statico per tubazione interrata [Da Deppo – Fognature 2009]

La deformazione del diametro orizzontale secondo Spangler è data dalla relazione:

$$\Delta d = \frac{QKF}{8SN + 0.061E_t}$$

in cui:

- $\Delta d$  deformazione assoluta diametrale del tubo in senso orizzontale [mm];

- $Q$  il carico totale gravante sul tubo dato dalla somma del carico dovuto al rinterro, al carico indotto dalla falda, dal carico dell'acqua contenuta nella tubazione e dai carichi veicolari e statici [kN/m];
- $K$  coefficiente di sottofondo, parametro che dipende dalla tipologia di appoggio del tubo sul fondo della trincea; si rimanda a quanto contenuto nella successiva tabella;
- $F$  coefficiente di deformazione differita. Esso tiene conto dell'incremento di deformazione che la condotta subisce nel tempo.
- $SN$  rigidità anulare della tubazione [kN/m<sup>2</sup>];

$E_t$  modulo di elasticità del terreno di rinfianco secondo Winkler [kN/m<sup>2</sup>]

Nota la deformazione assoluta si calcola la deformazione relativa  $\delta$  come rapporto tra  $\Delta d$  ed il diametro esterno  $DN$ . La verifica è superata se la deformazione  $\delta$  è minore della deformazione diametrale limite  $\delta_{LIM}$ :

$$\delta < \delta_{LIM}$$

La verifica deve essere condotta sia nelle condizioni di breve che di lungo termine ricordando che per la verifica a lungo termine il coefficiente di deformazione differita deve essere posto cautelativamente pari a 2. Si sottolinea che secondo Spangler il parametro  $\delta$  deve essere sempre inferiore al 5 %.

### 3.1.1 – Moduli di elasticità del terreno di rinfianco

Nella tabella seguente si riportano alcuni moduli di elasticità  $E_t$  per alcuni tipi di terreno (rinfianco) in funzione di vari gradi di compattazione (con LL si indica il limite di liquidità):

Tipo di terreno	Materiale alla rinfusa	Compattazione		
		Leggera	Moderata	Alta
	Indice Proctor	<85%	85-94%	>95%
Terreno coesivo LL > 50% Argilla e limo ad alta plasticità	Densità relativa	<40%	40-70%	>70%
Terreno coesivo LL < 50% Argilla e limo a media e bassa plasticità con meno del 25% di particelle di fango	0	0	0	350
Terreno granulare coesivo Ghiaia con particelle fini con bassa o media plasticità Sabbia con particelle fini con bassa o media plasticità	350	1400	2800	7000
Terreno senza coesione Ghiaia con curva granulometrica ben assortita o non ben assortita	700	2800	7000	14000
Rocce macinate	700	7000	14000	21000
	7000	21000	21000	21000

### ***Coefficiente di sottofondo***

Nella seguente tabella si riportano i valori del coefficiente di sottofondo **K** in funzione di diversi angoli di appoggio della tubazione sul fondo della trincea

Angolo appoggio $2\alpha$ [°]	Coefficiente sottofondo K
0	0.121
60	0.103
90	0.096
120	0.09
180	0.083

### VERIFICA DELL'INSTABILITÀ ALL'EQUILIBRIO ELASTICO

---

Una tubazione sollecitata da forze radiali uniformemente distribuite e dirette verso il centro di curvatura, dapprima rimane circolare, poi, all'aumentare delle forze si inflette ovalizzandosi (deformata a due lobi) e progressivamente si ha deformazione a tre lobi ecc. [Papiri, 2008].

Il carico critico  $q_a$  può essere quindi valutato secondo la nota formula di Eulero:

$$q_a = \frac{E}{(1-\nu^2)} \left( \frac{s}{DN-s} \right)^3$$

in cui:

- $q_a$  il carico critico di imbozzamento (buckling) [kN/m<sup>2</sup>]
- $E$  indica il modulo elastico del materiale [kN/m<sup>2</sup>];
- $\nu$  il coefficiente di Poisson del materiale costituente il tubo [-];
- $s$  rappresenta lo spessore del tubo [m].

In una tubazione interrata, la pressione di buckling dipende però non solamente dall'indice di rigidità della tubazione, ma anche dal modulo elastico del suolo che circonda la tubazione in quanto il sistema tubo-suolo si comporta come un'unica entità [Papiri, 2008].

La Norma ANSI-AWWA C950/88 fornisce la seguente espressione per la stima della pressione ammissibile di buckling,  $q_a$ :

$$q_a = \frac{1}{F_s} \left( 32R_w B' E_r \frac{E_m I}{DN^3} \right)^{\frac{1}{2}}$$

in cui:

- $q_a$  pressione ammissibile di buckling in N/m<sup>2</sup>;
- $F_s$  fattore di progettazione posto pari a 2,5;
- $R_w$  fattore di spinta idrostatica della falda dato dalla relazione  $R_w = 1 - 0.33 \frac{H_w}{H}$  con  $H$  altezza del rinterro in cm ed  $H_w$  è altezza della superficie libera della falda sulla sommità della tubazione in cm;
- $B'$  coefficiente empirico di supporto elastico (adimensionale), dato dalla relazione 
$$B' = \frac{1}{1 + 4e^{-0.213H}}$$
 con  $H$  espresso in m;
- $DN$  diametro esterno della tubazione;
- $E_t$  modulo elastico del terreno di rinterro;
- $E_m$  modulo elastico del materiale che costituisce il tubo;
- $I$  momento d'inerzia del tubo.

L'espressione precedente mostra chiaramente come la pressione ammissibile di buckling sia condizionata in egual misura dall'indice di rigidità della tubazione e dal modulo elastico del materiale di sottofondo e rinfianco della tubazione.

$$\gamma_w h + \frac{R_w Q_{st}}{DN} + \frac{(P + Q_{din})}{DN}$$

La verifica all'instabilità elastica si esegue confrontando la pressione ammissibile di buckling  $q_a$  con la risultante della pressione dovuta ai carichi esterni applicati valutata mediante la relazione:

in cui:

- $\gamma_w$  è il peso specifico dell'acqua;
- $h$  indica l'altezza della falda valutata rispetto l'estradosso delle tubazione [m];
- $Q_{st}$  il carico dovuto alla presenza del rinterro;
- $P$  il carico verticale gravante sul tubo dovuto a carichi statici posti sulla superficie;
- $Q_{din}$  il carico verticale accidentale associato al traffico veicolare;

La verifica è positiva se risulta:

$$\gamma_w h + \frac{R_w Q_{st}}{DN} + \frac{(P + Q_{din})}{DN} \leq q_a$$

## VERIFICA DELLE SOLLECITAZIONI

---

Al fine di verificare che le tensioni nelle sezioni maggiormente sollecitate della tubazioni siano minori delle tensioni massime ammissibili del materiale occorre calcolare le tensioni specifiche che si manifestano nelle tre sezioni più significative: al vertice (chiave), sul fianco e al fondo.

La metodologia ipotizza che il comportamento statico della condotta sia riconducibile a quello di un anello elastico sottile e che la sezione sia completamente reagente.

Il calcolo dei momenti  $M$  e degli sforzi normali  $N$  è condotto nell'ipotesi che l'azione sui fianchi della condotta fosse distribuita secondo il classico trapezio di spinta.

I valori dei parametri  $M$  (momento) ed  $N$  (sforzo normale) sono calcolati per le sezioni in chiave, sul fianco e sul fondo in funzione di varie aperture angolari dell'appoggio o sella d'appoggio ( $2\alpha = 180^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $90^\circ$ ) mediante le relazioni riportate in tabella [Da Deppo – Fognature 2009]

Parametri di sollecitazione per unità di lunghezza in una tubazione interrata per diverse ampiezze d'appoggio							
CARICHI	Angolo appoggio [°]	Sforzo Normale N			Momento Flettente M		
		Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo	Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo
Peso proprio $G_c$	180°	-0.027 $G_c$	+0.250 $G_c$	+0.027 $G_c$	+0.028 $G_c d$	-0.031 $G_c d$	+0.035 $G_c d$
	120°	-0.040 $G_c$	+0.250 $G_c$	+0.040 $G_c$	+0.030 $G_c d$	-0.035 $G_c d$	+0.042 $G_c d$
	90°	-0.053 $G_c$	+0.250 $G_c$	+0.053 $G_c$	+0.033 $G_c d$	-0.039 $G_c d$	-0.051 $G_c d$
Peso dell'acqua $Q_a$	180°	-0.186 $Q_a$	-0.068 $Q_a$	-0.451 $Q_a$	+0.028 $Q_a d$	-0.031 $Q_a d$	+0.035 $Q_a d$
	120°	-0.199 $Q_a$	-0.068 $Q_a$	-0.438 $Q_a$	+0.030 $Q_a d$	-0.035 $Q_a d$	+0.042 $Q_a d$
	90°	-0.212 $Q_a$	-0.068 $Q_a$	-0.424 $Q_a$	+0.033 $Q_a d$	-0.039 $Q_a d$	+0.051 $Q_a d$
Carico verticale uniforme $Q$	180°	0	+0.50 $Q$	0	+0.063 $Q d$	-0.063 $Q d$	+0.063 $Q d$
	120°	-0.013 $Q$	+0.50 $Q$	+0.013 $Q$	+0.066 $Q d$	-0.066 $Q d$	+0.069 $Q d$
	90°	-0.027 $Q$	+0.50 $Q$	+0.027 $Q$	+0.069 $Q d$	-0.070 $Q d$	+0.078 $Q d$
Spinta $H_o$	-	+0.5 $H_o$	0	+0.5 $H_o$	-0.063 $H_o d$	+0.063 $H_o d$	-0.063 $H_o d$
Spinta $H_t$	-	+0.313 $H_t$	0	+0.687 $H_t$	-0.052 $H_t d$	+0.063 $H_t d$	-0.073 $H_t d$

in cui:

- $G_c$  indica il peso proprio del tubo calcolato secondo la relazione  $G_c = \gamma_c \pi S D_m$  in cui si indica lo spessore della tubazione,  $D_m$  il diametro della fibra media e  $\gamma_c$  il peso specifico del materiale che costituisce il tubo;
- $Q_a$  [kN/m] indica il peso dell'acqua contenuto all'interno del tubo nell'ipotesi di completo riempimento;
- $Q$  indica il carico totale verticale dato dalla somma del carico associato al rinterro e dei carichi accidentali (veicoli + carichi statici distribuiti + carico idrostatico). Si rimanda a quanto contenuto in precedenza [kN/m];
- $H_o$  [kN/m] indica la reazione uniformemente distribuita data da  $H_o = \gamma_t \times H \times DN \times k_a$ , in cui  $k_a$  è il coefficiente di spinta attiva;  $DN$  il diametro esterno del tubo;  $H$  l'altezza del terreno di rinterro valutata dall'estradosso della tubazione [m];  $\gamma_t$  il peso specifico del terreno di rinterro.
- $H_t$  indica la spinta orizzontale distribuita linearmente pari a  $H_t = \gamma D^2 K_a / 2$

Noti i valori degli sforzi normali  $N$  e del momento flettente  $M$  per le tre sezioni indicate in precedenza, si procede al calcolo delle tensioni all'estradosso e all'intradosso della tubazione rispettivamente indicati con  $\sigma_e$  e  $\sigma_i$  mediante le relazioni:

$$\sigma_i = \frac{N}{s} - 6 \frac{M}{s^2} \qquad \sigma_e = \frac{N}{s} + 6 \frac{M}{s^2}$$

con  $s$  che indica lo spessore della tubazione

Ai fini della verifica i valori così ottenuti sono da confrontare con quelli ammissibili per il materiale che costituisce la tubazione oggetto di verifica.

## CALCOLO REAZIONE LATERALE DEL TERRENO

---

L'ovalizzazione del tubo indotta dai carichi che gravano su di esso è contrastata dal contenimento laterale fornito dal terreno. La pressione laterale uniformemente distribuita su una corda avente angolo al centro pari a  $90^\circ$  è calcolabile mediante la seguente relazione:

$$r_t = \frac{(q_{z_i} + \sigma_z + q_s + q_{idr}) c_r DN^4}{c_r DN^4 + 18.3 E_m s^3}$$

in cui:

- $r_t$  indica la pressione laterale del terreno [ $\text{kN/m}^2$ ];
- $q_{st}$  indica la pressione esercitata dal rinterro [ $\text{kN/m}^2$ ];
- $\sigma_z$  indica la pressione associata al carico veicolare [ $\text{kN/m}^2$ ];
- $q_s$  indica la pressione associata ai carichi statici distribuiti [ $\text{kN/m}^2$ ];
- $q_{idr}$  indica la pressione idrostatica [ $\text{kN/m}^2$ ];
- $c_r$  rappresenta il coefficiente di rigidità del terreno [ $\text{N/cm}^3$ ] pari a  $c_r = f_c H$  con  $H$  l'altezza del terreno valutata rispetto all'estradosso del tubo [m] mentre  $f_c$  esprime il fattore di compattazione del terreno i cui valori sono riportati nella tabella successiva in funzione di diversi gradi di compattazione;
- $DN$  indica il diametro esterno del tubo [mm];
- $E_m$  indica il modulo di elasticità del materiale a lungo termine [ $\text{kN/m}^2$ ];
- $s$  indica lo spessore del tubo [m].

La forza di reazione laterale  $R_t$  è data dalla relazione:

$$R_t = \frac{\sqrt{2}}{2} r_t DN$$

In cui:

- $R_t$  indica la forza laterale del terreno [kN/m];
- $r_t$  indica la pressione laterale del terreno [kN/m<sup>2</sup>];
- $DN$  è il diametro esterno della tubazione [m].

### 3.1.1 Fattore di compattazione del terreno

Nella tabella seguente si mostrano i valori del parametro  $f_c$  in funzione di diversi gradi di compattazione del terreno di rinfianco.

Grado di compattazione	$f_c$
Assente	1 -- 5
scarso	6 -- 10
Moderato	11 -- 13
Buono	14 -- 20

## 4 – VERIFICA STATICA TUBAZIONI RIGIDE

La verifica statica delle tubazioni rigide (calcestruzzo armato) è stata eseguita utilizzando il metodo diretto.

$$K_r / Q_s > \eta$$

in cui:

- $K_r$  è il carico di rottura in trincea ( $K_r = F_n \times E_z$ );
- $E_z$  = coefficiente di posa che dipende dalla rigidità del piano di posa;
- $F_n$  = carico di rottura per schiacciamento della tubazione, ottenuto come prodotto fra la classe di resistenza della tubazione e il diametro esterno della stessa.
- $Q_s$  = sommatoria sei carichi esterni:

$$Q_s = (q_{st} + q_{dn} + p_s + q_{idr} + q_a)$$

con:

$q_{st}$  = carico statico del rinterro

$q_{dn}$  = carico dinamico

$p_s$  = sovraccarico statico

$q_{idr}$  = sovraccarico idrostatico

$q_a$  = carico del fluido trasportato

- $\eta$  = coefficiente di sicurezza > 1,5

## BIBLIOGRAFIA E NORMATIVA DI RIFERIMENTO

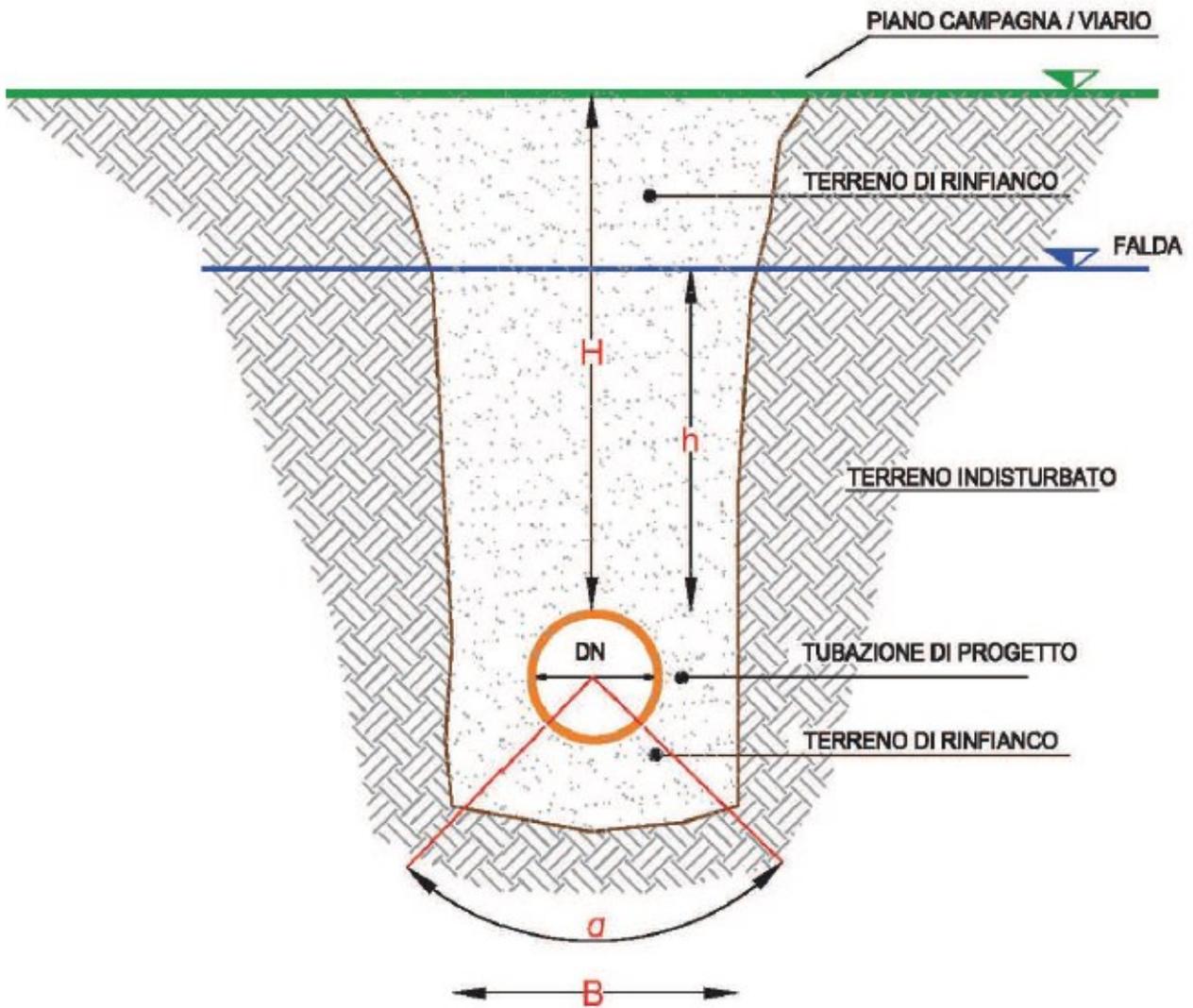
Normativa UNI 7517

Marston Spangler – Iowa State College Engineering Experiment Station [Da Deppo, 2009 Fognature]

Normativa DIN 1072

Da Deppo – Fognature 2009 - Papiri, 2008

## SCHEMA TRINCEA ADOTTATO



### LEGENDA DATI DI INPUT

- $B$  : larghezza dello scavo [m]
- $H$  : altezza dello scavo dall'estradosso del tubo [m]
- $h$  : altezza della falda dall'estradosso del tubo [m]
- $DN$  : diametro del tubo [mm]
- $a$  : angolo di supporto [°]

## RISULTATI DELLE VERIFICHE

---

**Condizione di posa 1 – Sezione di posa Tipo 2; 2A; Tipo 3 - Condizione di  $H_{scorrimento}$  minima**

### **DATI DI INPUT**

#### **Caratteristiche tubazione**

Materiale = ghisa sferoidale  
Diametro tubazione esterno (DN) = 532 mm  
Spessore parete tubazione (s) = 5.6 mm  
Modulo elasticità breve termine (E) = 120000000 kN/m<sup>2</sup>  
Modulo elasticità lungo termine (E<sub>m</sub>) = 120000000 kN/m<sup>2</sup>  
Diametro interno tubazione (D<sub>i</sub>) = DN – 2s = 520.80 mm  
Diametro medio (D<sub>m</sub>) = 526.40 mm  
Rigidezza anulare (breve termine) (SN<sub>bt</sub>) = 12.04 kN/m<sup>2</sup>  
Rigidezza anulare (lungo termine) (SN<sub>lt</sub>) = 12.04 kN/m<sup>2</sup>

#### **Carico del fluido trasportato**

Carico del fluido trasportato (Q<sub>a</sub>) = 2.09 kN/m

#### **Caratteristica trincea e rinterro**

Larghezza trincea sull'estradosso della tubazione (B) = 1.50m  
Altezza trincea sull'estradosso della tubazione (H) = 1.30 m  
Tipo di terreno di rinterro = Misto di cava di sabbia e ghiaia  
Peso specifico rinterro (γ<sub>t</sub>) = 20 kN/m<sup>3</sup>  
Peso specifico rinterro immerso (γ'<sub>t</sub>) = 16.5 kN/m<sup>3</sup>  
Angolo di attrito interno terreno rinterro (Φ) = 33 °  
Coefficiente attrito rinterro/pareti (μ) = 0.649  
Tipo di terreno rinfianco = Terreno senza coesione - Ghiaia con curva granulometrica ben assortita o non ben assortita  
Grado di compattazione del rinterro all'intorno del tubo - Indice Proctor = 85% - 94% - Compattazione moderata (Densità relativa 40-70%)  
Modulo elasticità del rinterro (E<sub>t</sub>) = 14000 kN/m<sup>2</sup>  
Peso specifico acqua (γ<sub>w</sub>) = 9.806 kN/m<sup>3</sup>  
Tipo di tubazione = Flessibile  
Tipo di trincea = Larga

#### **Carico statico del rinterro**

Altezza della falda su estradosso tubazione (h) = 0.00 m  
Coefficiente di spinta attiva (k<sub>a</sub>) = 0.295  
Coefficiente di Marston (C<sub>t</sub>) = --  
Carico statico del rinterro (Q<sub>st</sub>) = 13.12 kN/m  
Pressione verticale (q<sub>st</sub>) = 29.00 kN/m<sup>2</sup>

#### **Sovraccarico idrostatico**

Pressione della falda su estradosso tubazione (q<sub>idr</sub>) = 6.384 kN/m<sup>2</sup>  
Carico idrostatico (Q<sub>idr</sub>) = 3.396 kN/m

#### **Sovraccarico dinamico**

Tipologia di traffico = Traffico pesante  
Classe convoglio = HT60  
Carico per ruota (P) = 100 kN  
Coefficiente di incremento (φ) = 1.23  
Pressione dinamica (σ<sub>z</sub>) = 49.393  
Carico dinamico (Q<sub>din</sub>) = 26.277 kN/m<sup>2</sup>

### ***Sovraccarico statico***

Carico statico agente ( $P_n$ ) = 40 kN/m  
Larghezza di impronta ( $u_1$ ) = 1.00 m  
Lunghezza di impronta ( $u_2$ ) = 1.0 m  
Pressione statica ( $q_s$ ) = 3.09 kN/m<sup>2</sup>  
Coefficiente di diffusione ( $\beta$ ) = 0.88  
Sovraccarico statico ( $P_s$ ) = 1.44

### ***Carico totale sulla tubazione***

Carico del fluido trasportato ( $Q_a$ ) = 2.09 kN/m  
Sovraccarico statico dovuto al rinterro ( $Q_{st}$ ) = 13.12 kN/m  
Sovraccarico idrostatico ( $Q_{idr}$ ) = 3.40 kN/m  
Sovraccarico dinamico stradale ( $Q_{din}$ ) = 26.277 kN/m  
Sovraccarico statico ( $P_s$ ) = 1.44 kN/m

**Carico totale sulla tubazione ( $Q_{tot}$ ) = 46.32 kN/m**

## ***VERIFICHE PER TUBAZIONI FLESSIBILI***

### ***Verifica delle deformazioni a breve termine***

Angolo di appoggio ( $2\alpha$ ) = 90  
Coefficiente di sottofondo ( $K$ ) = 0.096  
Coefficiente di deformazione differita ( $F$ ) = 1  
Deformazione diametrale del tubo ( $\Delta_d$ ) = 4.68 mm  
Deformazione percentuale ( $\delta$ ) = 0.88 %  
Deformazione massima ammissibile ( $\delta_{lim}$ ) = 5 %  
Verifica soddisfatta = SI

### ***Verifica delle deformazioni a lungo termine***

Coefficiente di deformazione differita ( $F$ ) = 2  
Deformazione diametrale del tubo ( $\Delta_d$ ) = 9.36 mm  
Deformazione percentuale ( $\delta$ ) = 1.76 %  
Deformazione massima ammissibile ( $\delta_{lim}$ ) = 5 %  
Verifica soddisfatta = SI

### ***Verifica di instabilità all'equilibrio elastico***

Fattore di progettazione ( $F_s$ ) = 2.5  
Fattore di spinta idrostatica ( $R_w$ ) = 0.90  
Coefficiente empirico supporto elastico ( $B'$ ) = 0.248  
Pressione risultante dovuta ai carichi esterni ( $P_{est}$ ) = 74.36  
Pressione ammissibile di Bucking (ANSI-AWWA C950/88) - Breve termine = 432.51 kN/m<sup>2</sup>

**Verifica soddisfatta = SI**

Pressione ammissibile di Bucking (ANSI-AWWA C950/88) - Lungo termine = 432.51 kN/m<sup>2</sup>

**Verifica soddisfatta = SI**

### ***Calcolo del massimo sforzo di trazione***

Peso specifico materiale tubazione ( $\gamma_c$ ) = 75 kN/m<sup>3</sup>  
Tensione all'estradosso Sezione chiave ( $\sigma_{e\_chiave}$ ) = 289.554 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione chiave ( $\sigma_{i\_chiave}$ ) = -289.331 Mpa  
Tensione all'estradosso Sezione sul fianco ( $\sigma_{e\_fianco}$ ) = -290.755 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione sul fianco ( $\sigma_{i\_fianco}$ ) = 298.665 Mpa  
Tensione all'estradosso Sezione sul fondo ( $\sigma_{e\_fondo}$ ) = 326.596 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione sul fondo ( $\sigma_{i\_fondo}$ ) = -325.539 Mpa  
Tensione max ( $\sigma_{max}$ ) = 326.596 Mpa

Tensione min ( $\sigma_{min}$ ) = -325.539 Mpa

Tensione ammissibile (in funzione del materiale della tubazione) = 400 Mpa

**Verifica soddisfatta = SI**

**Calcolo della reazione laterale del terreno**

Grado di compattazione = Buono

Fattore di compattazione = 15

Coefficiente rigidità terreno = 19.50 N/cm<sup>3</sup>

Pressione laterale terreno a breve termine ( $r_{tbt}$ ) = 70.468 kN/m

Fattore di reazione laterale a breve termine ( $R_{tbt}$ ) = 26.509 kN/m

Pressione laterale terreno a lungo termine ( $r_{tit}$ ) = 70.468 kN/m

Fattore di reazione laterale lungo termine ( $R_{tit}$ ) = 26.509 kN/m

	Carichi (kN/m)	Sforzo Normale N			Momento Flettente M		
		Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo	Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo
Peso proprio $G_e$	0.69	-0.036812	0.173642	0.036812	0.012194	-0.014411	-0.018845
Peso dell'acqua $Q_a$	2.09	-0.442760	-0.142017	-0.885520	0.036666	-0.043332	0.056665
Carico vert. uniforme Q	44.23	-1.194294	22.116549	1.194294	1.623709	-1.647241	1.835497
Spinta $H_0$	4.08	2.038843	0	2.038843	-0.136668	0.136668	-0.136668
Spinta $H_t$	0.83	0.261154	0	0.573203	-0.023082	0.027964	-0.032403
Totale	51.93	0.626	22.148	2.958	1.513	-1.540	1.704

**Condizione di posa 2 – Sezione di posa Tipo 1 - Condizione di  $H_{scorrimento}$  minima**

**DATI DI INPUT**

**Caratteristiche tubazione**

Materiale = ghisa sferoidale  
Diametro tubazione esterno (DN) = 532 mm  
Spessore parete tubazione (s) = 5.6 mm  
Modulo elasticità breve termine (E) = 120000000 kN/m<sup>2</sup>  
Modulo elasticità lungo termine (E<sub>m</sub>) = 120000000 kN/m<sup>2</sup>  
Diametro interno tubazione (D<sub>i</sub>) = DN – 2s = 520.80 mm  
Diametro medio (D<sub>m</sub>) = 526.40 mm  
Rigidezza anulare (breve termine) (SN<sub>bt</sub>) = 12.04 kN/m<sup>2</sup>  
Rigidezza anulare (lungo termine) (SN<sub>lt</sub>) = 12.04 kN/m<sup>2</sup>

**Carico del fluido trasportato**

Carico del fluido trasportato (Q<sub>a</sub>) = 2.09 kN/m

**Caratteristica trincea e rinterro**

Larghezza trincea sull'estradosso della tubazione (B) = 1.50m  
Altezza trincea sull'estradosso della tubazione (H) = 1.00 m  
Tipo di terreno di rinterro = Sabbia argillosa  
Peso specifico rinterro (γ<sub>t</sub>) = 18 kN/m<sup>3</sup>  
Peso specifico rinterro immerso (γ'<sub>t</sub>) = 15.9 kN/m<sup>3</sup>  
Angolo di attrito interno terreno rinterro (Φ) = 15 °  
Coefficiente attrito rinterro/pareti (μ) = 0.268  
Tipo di terreno rinfianco = Terreno senza coesione - Ghiaia con curva granulometrica ben assortita o non ben assortita  
Grado di compattazione del rinterro all'intorno del tubo - Indice Proctor = 85% - 94% - Compattazione moderata (Densità relativa 40-70%)  
Modulo elasticità del rinterro (E<sub>t</sub>) = 14000 kN/m<sup>2</sup>  
Peso specifico acqua (γ<sub>w</sub>) = 9.806 kN/m<sup>3</sup>  
Tipo di tubazione = Flessibile  
Tipo di trincea = Larga

**Carico statico del rinterro**

Altezza della falda su estradosso tubazione (h) = 0.00 m  
Coefficiente di spinta attiva (k<sub>a</sub>) = 0.589  
Coefficiente di Marston (C<sub>t</sub>) = --  
Carico statico del rinterro (Q<sub>st</sub>) = 9.15 kN/m  
Pressione verticale (q<sub>st</sub>) = 20.23 kN/m<sup>2</sup>

**Sovraccarico idrostatico**

Pressione della falda su estradosso tubazione (q<sub>idr</sub>) = 6.384 kN/m<sup>2</sup>  
Carico idrostatico (Q<sub>idr</sub>) = 3.396 kN/m

**Sovraccarico dinamico**

Tipologia di traffico = Traffico leggero  
Classe convoglio = LT12  
Carico per ruota (P) = 20 kN  
Coefficiente di incremento (φ) = 1.30  
Pressione dinamica (σ<sub>z</sub>) = 22.732  
Carico dinamico (Q<sub>din</sub>) = 12.093 kN/m<sup>2</sup>

**Sovraccarico statico**

Carico statico agente (P<sub>n</sub>) = 40 kN/m  
Larghezza di impronta (u<sub>1</sub>) = 1.00 m  
Lunghezza di impronta (u<sub>2</sub>) = 1.0 m

Pressione statica ( $q_s$ ) = 4.44 kN/m<sup>2</sup>  
Coefficiente di diffusione ( $\beta$ ) = 0.88  
Sovraccarico statico ( $P_s$ ) = 2.08

#### ***Carico totale sulla tubazione***

Carico del fluido trasportato ( $Q_a$ ) = 2.09 kN/m  
Sovraccarico statico dovuto al rinterro ( $Q_{st}$ ) = 9.15 kN/m  
Sovraccarico idrostatico ( $Q_{idr}$ ) = 3.40 kN/m  
Sovraccarico dinamico stradale ( $Q_{din}$ ) = 12.093 kN/m  
Sovraccarico statico ( $P_s$ ) = 2.08 kN/m  
**Carico totale sulla tubazione ( $Q_{tot}$ ) = 28.80 kN/m**

#### ***VERIFICHE PER TUBAZIONI FLESSIBILI***

##### ***Verifica delle deformazioni a breve termine***

Angolo di appoggio ( $2\alpha$ ) = 90  
Coefficiente di sottofondo ( $K$ ) = 0.096  
Coefficiente di deformazione differita ( $F$ ) = 1  
Deformazione diametrale del tubo ( $\Delta_d$ ) = 2.91 mm  
Deformazione percentuale ( $\delta$ ) = 0.55 %  
Deformazione massima ammissibile ( $\delta_{lim}$ ) = 5 %  
Verifica soddisfatta = SI

##### ***Verifica delle deformazioni a lungo termine***

Coefficiente di deformazione differita ( $F$ ) = 2  
Deformazione diametrale del tubo ( $\Delta_d$ ) = 5.82 mm  
Deformazione percentuale ( $\delta$ ) = 1.09 %  
Deformazione massima ammissibile ( $\delta_{lim}$ ) = 5 %  
Verifica soddisfatta = SI

##### ***Verifica di instabilità all'equilibrio elastico***

Fattore di progettazione ( $F_s$ ) = 2.5  
Fattore di spinta idrostatica ( $R_w$ ) = 0.87  
Coefficiente empirico supporto elastico ( $B'$ ) = 0.236  
Pressione risultante dovuta ai carichi esterni ( $P_{est}$ ) = 41.65  
Pressione ammissibile di Bucking (ANSI-AWWA C950/88) - Breve termine = 415.24 kN/m<sup>2</sup>  
**Verifica soddisfatta = SI**  
Pressione ammissibile di Bucking (ANSI-AWWA C950/88) - Lungo termine = 415.24 kN/m<sup>2</sup>  
**Verifica soddisfatta = SI**

##### ***Calcolo del massimo sforzo di trazione***

Peso specifico materiale tubazione ( $\gamma_c$ ) = 75 kN/m<sup>3</sup>  
Tensione all'estradosso Sezione chiave ( $\sigma_{e\_chiave}$ ) = 153.260 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione chiave ( $\sigma_{i\_chiave}$ ) = -152.514 Mpa  
Tensione all'estradosso Sezione sul fianco ( $\sigma_{e\_fianco}$ ) = -153.236 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione sul fianco ( $\sigma_{i\_fianco}$ ) = 158.018 Mpa  
Tensione all'estradosso Sezione sul fondo ( $\sigma_{e\_fondo}$ ) = 172.708 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione sul fondo ( $\sigma_{i\_fondo}$ ) = -171.378 Mpa  
Tensione max ( $\sigma_{max}$ ) = 172.708 Mpa  
Tensione min ( $\sigma_{min}$ ) = -171.378 Mpa  
Tensione ammissibile (in funzione del materiale della tubazione) = 400 Mpa  
**Verifica soddisfatta = SI**

##### ***Calcolo della reazione laterale del terreno***

Grado di compattazione = Moderato  
Fattore di compattazione = 11  
Coefficiente rigidità terreno = 15.00 N/cm<sup>3</sup>

Riefficientamento dell'opera di presa "sorgente verde" e potenziamento della capacità di trasporto della risorsa idrica  
 – 1° stralcio Funzionale Fara San Martino – Casoli  
 Progetto esecutivo - RELAZIONE di VERIFICA STATICA DELLE CONDOTTE

Pressione laterale terreno a breve termine ( $r_{ibt}$ ) = 40.717 kN/m

Fattore di reazione laterale a breve termine ( $R_{ibt}$ ) = 15.317 kN/m

Pressione laterale terreno a lungo termine ( $r_{ilt}$ ) = 40.717 kN/m

Fattore di reazione laterale lungo termine ( $R_{ilt}$ ) = 15.317 kN/m

	Carichi (kN/m)	Sforzo Normale N			Momento Flettente M		
		Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo	Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo
Peso proprio $G_c$	0.69	-0.036812	0.173642	0.036812	0.012194	-0.014411	-0.018845
Peso dell'acqua $Q_a$	2.09	-0.442760	-0.142017	-0.885520	0.036666	-0.043332	0.056665
Carico vert. uniforme Q	39.75	-1.073305	19.876025	1.073305	1.459218	-1.480366	1.649551
Spinta $H_0$	22.55	11.276520	0	11.276520	-0.755888	0.755888	-0.755888
Spinta $H_t$	1.50	0.469430	0	1.030347	-0.041490	0.050267	-0.058245
Totale	66.59	10.193	19.908	12.531	0.711	-0.732	0.87
Spinta $H_t$	1.50	0.469430	0	1.030347	-0.041490	0.050267	-0.058245
Totale	66.59	10.193	19.908	12.531	0.711	-0.732	0.87

**Condizione di posa 3 – Sezione di posa Tipo 2A, 2B, 3 - Condizione di  $H_{scorrimento}$  massima**

**DATI DI INPUT**

**Caratteristiche tubazione**

Materiale = ghisa sferoidale  
Diametro tubazione esterno (DN) = 532 mm  
Spessore parete tubazione (s) = 5.6 mm  
Modulo elasticità breve termine (E) = 120000000 kN/m<sup>2</sup>  
Modulo elasticità lungo termine (E<sub>m</sub>) = 120000000 kN/m<sup>2</sup>  
Diametro interno tubazione (D<sub>i</sub>) = DN – 2s = 520.80 mm  
Diametro medio (D<sub>m</sub>) = 526.40 mm  
Rigidezza anulare (breve termine) (SN<sub>bt</sub>) = 12.04 kN/m<sup>2</sup>  
Rigidezza anulare (lungo termine) (SN<sub>lt</sub>) = 12.04 kN/m<sup>2</sup>

**Carico del fluido trasportato**

Carico del fluido trasportato (Q<sub>a</sub>) = 2.09 kN/m

**Caratteristica trincea e rinterro**

Larghezza trincea sull'estradosso della tubazione (B) = 2.00m  
Altezza trincea sull'estradosso della tubazione (H) = 4.50 m  
Tipo di terreno di rinterro = Misto di cava di sabbia e ghiaia  
Peso specifico rinterro (γ<sub>t</sub>) = 20 kN/m<sup>3</sup>  
Peso specifico rinterro immerso (γ'<sub>t</sub>) = 16.5 kN/m<sup>3</sup>  
Angolo di attrito interno terreno rinterro (Φ) = 33 °  
Coefficiente attrito rinterro/pareti (μ) = 0.649  
Tipo di terreno rinfianco = Terreno senza coesione - Ghiaia con curva granulometrica ben assortita o non ben assortita  
Grado di compattazione del rinterro all'intorno del tubo - Indice Proctor = 85% - 94% - Compattazione moderata (Densità relativa 40-70%)  
Modulo elasticità del rinterro (E<sub>t</sub>) = 14000 kN/m<sup>2</sup>  
Peso specifico acqua (γ<sub>w</sub>) = 9.806 kN/m<sup>3</sup>  
Tipo di tubazione = Flessibile  
Tipo di trincea = Larga

**Carico statico del rinterro**

Altezza della falda su estradosso tubazione (h) = 0.385 m  
Coefficiente di spinta attiva (k<sub>a</sub>) = 0.295  
Coefficiente di Marston (C<sub>t</sub>) = --  
Carico statico del rinterro (Q<sub>st</sub>) = 47.16 kN/m  
Pressione verticale (q<sub>st</sub>) = 104.30 kN/m<sup>2</sup>

**Sovraccarico idrostatico**

Pressione della falda su estradosso tubazione (q<sub>idr</sub>) = 6.384 kN/m<sup>2</sup>  
Carico idrostatico (Q<sub>idr</sub>) = 3.396 kN/m

**Sovraccarico dinamico**

Tipologia di traffico = Traffico pesante  
Classe convoglio = HT60  
Carico per ruota (P) = 100 kN  
Coefficiente di incremento (φ) = 1.07  
Pressione dinamica (σ<sub>z</sub>) = 11.674  
Carico dinamico (Q<sub>din</sub>) = 6.211 kN/m<sup>2</sup>

**Sovraccarico statico**

Carico statico agente (P<sub>n</sub>) = 40 kN/m  
Larghezza di impronta (u<sub>1</sub>) = 1.00 m

Lunghezza di impronta ( $u_2$ ) = 1.0 m  
Pressione statica ( $q_s$ ) = 0.40 kN/m<sup>2</sup>  
Coefficiente di diffusione ( $\beta$ ) = 0.88  
Sovraccarico statico ( $P_s$ ) = 0.19

#### **Carico totale sulla tubazione**

Carico del fluido trasportato ( $Q_a$ ) = 2.09 kN/m  
Sovraccarico statico dovuto al rinterro ( $Q_{st}$ ) = 47.16 kN/m  
Sovraccarico idrostatico ( $Q_{idr}$ ) = 3.40 kN/m  
Sovraccarico dinamico stradale ( $Q_{din}$ ) = 6.211 kN/m  
Sovraccarico statico ( $P_s$ ) = 0.19 kN/m  
**Carico totale sulla tubazione ( $Q_{tot}$ ) = 59.05 kN/m**

#### **VERIFICHE PER TUBAZIONI FLESSIBILI**

##### **Verifica delle deformazioni a breve termine**

Angolo di appoggio ( $2\alpha$ ) = 90  
Coefficiente di sottofondo (K) = 0.096  
Coefficiente di deformazione differita (F) = 1  
Deformazione diametrale del tubo ( $\Delta_d$ ) = 5.96 mm  
Deformazione percentuale ( $\delta$ ) = 1.12 %  
Deformazione massima ammissibile ( $\delta_{lim}$ ) = 5 %  
Verifica soddisfatta = SI

##### **Verifica delle deformazioni a lungo termine**

Coefficiente di deformazione differita (F) = 2  
Deformazione diametrale del tubo ( $\Delta_d$ ) = 11.93 mm  
Deformazione percentuale ( $\delta$ ) = 2.24 %  
Deformazione massima ammissibile ( $\delta_{lim}$ ) = 5 %  
Verifica soddisfatta = SI

##### **Verifica di instabilità all'equilibrio elastico**

Fattore di progettazione ( $F_s$ ) = 2.5  
Fattore di spinta idrostatica ( $R_w$ ) = 0.97  
Coefficiente empirico supporto elastico (B') = 0.395  
Pressione risultante dovuta ai carichi esterni ( $P_{est}$ ) = 98.18  
Pressione ammissibile di Bucking (ANSI-AWWA C950/88) - Breve termine = 566.24 kN/m<sup>2</sup>  
**Verifica soddisfatta = SI**  
Pressione ammissibile di Bucking (ANSI-AWWA C950/88) - Lungo termine = 566.24 kN/m<sup>2</sup>  
**Verifica soddisfatta = SI**

##### **Calcolo del massimo sforzo di trazione**

Peso specifico materiale tubazione ( $\gamma_c$ ) = 14.70 kN/m<sup>3</sup>  
Tensione all'estradosso Sezione chiave ( $\sigma_{e\_chiave}$ ) = 313.518 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione chiave ( $\sigma_{i\_chiave}$ ) = -311.614 Mpa  
Tensione all'estradosso Sezione sul fianco ( $\sigma_{e\_fianco}$ ) = -313.721 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione sul fianco ( $\sigma_{i\_fianco}$ ) = 323.854 Mpa  
Tensione all'estradosso Sezione sul fondo ( $\sigma_{e\_fondo}$ ) = 367.102 Mpa  
Tensione all'intradosso Sezione sul fondo ( $\sigma_{i\_fondo}$ ) = -364.141 Mpa  
Tensione max ( $\sigma_{max}$ ) = 367.102 Mpa  
Tensione min ( $\sigma_{min}$ ) = -364.141 Mpa  
Tensione ammissibile (in funzione del materiale della tubazione) = 400 Mpa  
**Verifica soddisfatta = SI**

##### **Calcolo della reazione laterale del terreno**

Grado di compattazione = Moderato  
Fattore di compattazione = 11

Riefficientamento dell'opera di presa "sorgente verde" e potenziamento della capacità di trasporto della risorsa idrica  
 – 1° stralcio Funzionale Fara San Martino – Casoli  
 Progetto esecutivo - RELAZIONE di VERIFICA STATICA DELLE CONDOTTE

Coefficiente rigidità terreno =  $67.50 \text{ N/cm}^3$

Pressione laterale terreno a breve termine ( $r_{ibt}$ ) =  $114.582 \text{ kN/m}$

Fattore di reazione laterale a breve termine ( $R_{ibt}$ ) =  $43.104 \text{ kN/m}$

Pressione laterale terreno a lungo termine ( $r_{ilt}$ ) =  $114.582 \text{ kN/m}$

Fattore di reazione laterale lungo termine ( $R_{ilt}$ ) =  $43.104 \text{ kN/m}$

	Carichi (kN/m)	Sforzo Normale N				Momento Flettente M	
		Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo	Sezione chiave	Sezione sul fianco	Sezione sul fondo
Peso proprio $G_c$	0.14	-0.007215	0.034034	0.007215	0.002390	-0.002825	-0.003694
Peso dell'acqua $Q_a$	2.09	-0.442760	-0.142017	-0.885520	0.036666	-0.043332	0.056665
Carico verticale uniforme $Q$	56.96	-1.537843	28.478573	1.537843	2.090783	-2.121084	2.363494
Spinta $H_0$	14.12	7.057533	0	7.057533	-0.473081	0.473081	-0.473081
Spinta $H_t$	0.83	0.261154	0	0.573203	-0.023082	0.027964	-0.032403
Totale	74.13	5.331	28.371	8.290	1.634	-1.666	1.911