

INDICE

1	Premessa	2
2	Verifica statica di tubazioni “flessibili”	3
2.1	Calcolo del carico dovuto al rinterro	3
2.2	Calcolo del carico dovuto ai sovraccarichi mobili	3
2.3	Calcolo e verifica dell’inflessione diametrale	3
2.4	Calcolo e verifica della sollecitazione massima di flessione.....	5
2.5	Verifica all’instabilità all’equilibrio elastico	5
2.6	Risultati dei calcoli sulle tubazioni “flessibili”	6

VERIFICA STATICA DELLE TUBAZIONI

1 Premessa

Gli sforzi a cui è soggetta una tubazione interrata non sono facilmente quantificabili. Le principali componenti che determinano il carico sul condotto sono il riempimento di terreno ed eventuali sovraccarichi accidentali, siano essi statici o dinamici.

Questi due fattori preponderanti sono collegati e dipendenti da una serie di variabili che concorrono a definire il carico finale sulla tubazione.

Queste sono: profondità di posa, tipo di terreno, profilo della sezione di scavo, stato di costipamento del suolo, presenza di acqua di falda.

Altro fattore fondamentale per verificare il comportamento di una tubazione interrata è il suo comportamento statico, che dipende dalla tipologia di materiale con cui è fatto il tubo; la metodologia di calcolo, infatti, cambia a seconda che il comportamento del materiale nelle condizioni di posa in cui si trova il tubo è di tipo “rigido” o “flessibile”.

Le tubazioni in gres ceramico ed in cemento armato, dal punto di vista statico, hanno un comportamento di tipo “rigido”.

Per questo tipo di tubazioni, la verifica statica viene effettuata confrontando il carico reale che tali condotte devono sopportare, con il carico di rottura determinato dalle prove sui materiali.

I tubi in PVC e altri materiali plastici (PE, PP, PRFV), invece, devono essere considerati “flessibili”.

Questo tipo di condotti tendono ad ovalizzarsi sotto l'effetto dei carichi sovrastanti, pertanto, per essi, è necessario un'attenzione particolare alla tipologia di posa scelta; la caratteristica di flessibilità di detti tubi richiede, infatti, conseguentemente una rigidità particolarmente elevata per il terreno che circonda i tubi stessi.

Le tubazioni in Ghisa ed Acciaio hanno invece un comportamento intermedio tra i due, è pertanto necessario per ogni tubazione e situazione di posa determinare il tipo di comportamento associato.

Secondo la norma UNI 7517/76 si definisce il coefficiente d'elasticità n:

$$n = \frac{E_s}{E_t} \left(\frac{r}{s} \right)^3 \quad (1)$$

Dove:

- E_s = modulo elastico del terreno (assunto pari a 6.9 MPa)
- E_t = modulo elastico della tubazione
- s = spessore della tubazione
- r = raggio medio della tubazione = $(D_{est} - s)/2$

La tubazione interrata è flessibile se risulta $n \geq 1$

Nel caso in esame, il progetto prevede:

- tubazioni in PVC SN8 con letto di posa TIPO 3.1 (completo in sabbia);

E' stata quindi applicata la metodologia di calcolo qui di seguito riassunta.

La vita nominale dell'opera è pari a 50 anni, la classe d'uso secondo le NTC2018 è la II.

Tutte i parametri contenuti nelle forme formule sotto riportate si ritengono espresse secondo il Sistema Internazionale ove non specificato diversamente.

2 Verifica statica di tubazioni “flessibili”

Per la verifica statica delle tubazioni flessibili si possono seguire le indicazioni riportate nella norma AWWA (American Water Works Association) C950/88 che si riferisce a tubi a pressione in resine termoindurenti rinforzate con fibre di vetro, ma che può essere ragionevolmente estesa a tutti i materiali plastici e alle tubazioni flessibili in generale.

Le verifiche vengono effettuate considerando le caratteristiche di resistenza a lungo termine dei materiali utilizzati; è noto infatti che i materiali plastici vanno incontro ad un decadimento nel tempo delle loro caratteristiche meccaniche.

Le operazioni da effettuarsi nell'ambito della verifica statica delle tubazioni flessibili sono le seguenti:

- valutazione e verifica dell'inflessione diametrale a lungo termine
- valutazione e verifica della massima sollecitazione a flessione della sezione trasversale
- valutazione e verifica del carico critico di collasso

2.1 Calcolo del carico dovuto al rinterro

Per tubazioni flessibili la letteratura tecnica suggerisce di calcolare il peso del terreno secondo la seguente formula:

$$W_c = \gamma_t D H$$

dove:

γ_t è il peso specifico del terreno,

D è il diametro esterno della condotta,

H è l'altezza della trincea rispetto all'estradosso della condotta

2.2 Calcolo del carico dovuto ai sovraccarichi mobili

I sovraccarichi verticali dovuti al passaggio dei veicoli vengono calcolati come descritto per le tubazioni rigide.

2.3 Calcolo e verifica dell'inflessione diametrale

L'inflessione massima anticipata nella tubazione, con il 95% di probabilità, è fornita dalla seguente espressione:

$$\Delta y = \frac{(D_e W_c + W_l) K_x r^3}{E_t I + 0.061 K_a E_s r^3} + \Delta a$$

dove:

Δy è l'inflessione diametrale del tubo [cm]

D_e è il fattore di ritardo d'inflessione

W_c è il carico verticale del suolo per unità di lunghezza [N/cm]

W è il carico mobile sul tubo per unità di lunghezza [N/cm]

K_x è il coefficiente di inflessione che dipende dalla capacità di sostegno fornita dal suolo all'arco d'appoggio del tubo

R è il raggio medio del tubo, pari a $(D-s)/2$ [cm]

E_t modulo elastico della tubazione [N/cm²]

I momento d'inerzia della tubazione [cm³]

E/I è il fattore di rigidità trasversale della tubazione [N*cm]

E_s è il modulo elastico del terreno [N/cm²]

K_a , Δa sono parametri che permettono di passare dall'inflessione media (50% di probabilità) all'inflessione massima caratteristica (frattile di ordine 0,95 della distribuzione statica dell'inflessione).

Tabella 1 - Fattore di ritardo d'inflessione D_e

TIPO DI RINTERRO E GRADO DI COSTIPAMENTO	D_e
Rinterro poco profondo con grado di costipamento da moderato a elevato	2.0
Materiale scaricato alla rinfusa o grado di costipamento leggero	1.5

Tabella 2- Coefficiente d'inflessione K_x

TIPO D'INSTALLAZIONE	ANGOLO EQUIVAL. DI LETTO [GRADI]	COEFF. K_x
Fondo sagomato con materiale di riempimento ben costipato ai fianchi del tubo (densità Proctor $\geq 95\%$) o materiale di letto e rinfiato di tipo ghiaioso leggermente costipato (densità Proctor $\geq 70\%$)	180	0.083
Fondo sagomato con materiale di riempimento moderatamente costipato ai fianchi del tubo (densità Proctor $\geq 85\%$ e $< 95\%$) o materiale di letto e rinfiato di tipo ghiaioso.	60	0.103
Fondo piatto con materiale di riempimento sciolto posato ai fianchi del tubo (non raccomandato)	0	0.110

Tabella 3- Valori dei parametri K_a e Δa

ALTEZZA H DEL RINTERRO [m]	Δa	K_a
$H < 4.9$ m	0	0.75
$H > 4.9$ m e materiale scaricato alla rinfusa e con leggero grado di costipamento	$0.02D$	1.0
$H > 4.9$ m e materiale con moderato grado di costipamento	$0.01D$	1.0
$H > 4.9$ m e materiale con elevato grado di costipamento	$0.005D$	1.0

Per tubazioni in PEad ed in PVC l'inflessione diametrale a lungo termine non deve superare il 5% del

diametro iniziale della condotta.

2.4 Calcolo e verifica della sollecitazione massima di flessione

La sollecitazione massima di flessione che risulta dall'inflessione del tubo non deve eccedere la resistenza a flessione a lungo termine del prodotto, ridotta tramite un fattore di sicurezza.

In particolare dovrà risultare:

$$\sigma = D_f E_t \left(\frac{\Delta y}{D} \right) \left(\frac{s}{D} \right) \leq \frac{\sigma_{lim}}{\mu}$$

dove:

σ è la tensione dovuta alla deflessione diametrale [N/cm²];

σ_{lim} è la tensione limite ultima [N/cm²]

D_f è un fattore di forma i cui valori sono stati parametrizzati in funzione dell'indice di rigidezza SN ($SN = \frac{E_t I}{D_m^3}$ dove D_m rappresenta il diametro medio della condotta) della tubazione e delle caratteristiche geotecniche del riporto;

μ è un coefficiente di sicurezza, pari a 1.5;

Tabella 4- Fattore di forma D_f

INDICE DI RIGIDEZZA DELLA TUBAZIONE SN [N/m ²]	TIPO DI MATERIALE DI SOTTOFONDO E RINFIANCO E GRADO DI COSTIPAMENTO			
	GHIAIOSO		SABBIOSO	
	Da naturale a leggero	Da moderato a elevato	Da naturale a leggero	Da moderato a elevato
1150	5.5	7.0	6.0	8.0
2300	4.5	5.5	5.0	6.5
4600	3.8	4.5	4.0	5.5
9200	3.3	3.8	3.5	4.5

2.5 Verifica all'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 (ovalizzazione o deformata a due lobi) e progressivamente si ha deformazione a tre lobi, ecc.

Il carico critico per unità di superficie vale:

$$p_{cr} = (n_l^2 - 1) \frac{E_t I}{r^3}$$

dove n_l è il numero dei lobi della deformata.

Il carico critico che provoca la deformazione a due lobi è quindi pari a:

$$p_{cr} = 3 \frac{E_t I}{r^3}$$

La forza critica per unità di lunghezza che provoca l'instabilità elastica è:

$$P_{cr} = p_{cr} D$$

Per quanto riguarda le tubazioni interrate, la sollecitazione che determina l'instabilità elastica è legata, oltre alle caratteristiche meccaniche della tubazione, anche al modulo elastico E_s del suolo che circonda la tubazione.

La norma ANSI-AWWA C950/88 propone la seguente espressione per la valutazione della pressione ammissibile (definita anche "pressione ammissibile di Buckling"):

$$q_a = \frac{1}{FS} (32 R_w B' E_s \frac{E_t I}{D^3})^{1/2}$$

dove:

q_a è la pressione ammissibile di buckling [N/cm²]

FS è il fattore di progettazione, pari a 2.5

R_w è il fattore di spinta idrodinamica della falda eventualmente presente

$$R_w = 1 - 0.33(H_w/H) \quad \text{con } 0 \leq H_w \leq H$$

B' è il coefficiente empirico di supporto elastico fornito dalla relazione

$$B' = 1 / (1 + 4e^{-0.213H})$$

H è l'altezza di rinterro [cm]

H_w è l'altezza della superficie libera della falda sulla sommità della tubazione [cm]

Nel caso in cui la verifica inerente all'inflessione diametrale fornisca valori prossimi al limite massimo accettabile si dovrà utilizzare un fattore di progettazione $FS=3$ in luogo di 2.5.

La verifica all'instabilità elastica si esegue confrontando la pressione ammissibile q_a con la risultante dei carichi esterni applicati.

In particolare, dovrà risultare:

$$Ris = \gamma_w + R_w \frac{W_c}{D} + \frac{W_l}{D} \leq q_a$$

L'inflessione diametrale, le sollecitazioni e la pressione massima ammissibile di buckling in una tubazione flessibile interrata dipendono in maniera determinante dal modulo di elasticità del suolo e quindi dal tipo di terreno utilizzato per letto di posa ed il rinfianco della tubazione e dal grado di costipamento.

2.6 Risultati dei calcoli sulle tubazioni "flessibili"

Le tabelle che seguono riportano i risultati di verifica del calcolo statico relativo ogni tratto di tubazione "flessibile".

Analisi dei carichi

Tratto	CARICO DOVUTO AL RINTERRO				SOVRACCARICHI VERTICALI MOBILI											
					Calcolo del sovraccarico mobile su strada asfaltata				Calcolo del sovraccarico mobile su strade carrarecce							
					CONVOGLIO HT				(il massimo tra il carico dovuto al transito di un convoglio Lt6 ed un mezzo cingolato)							
	γ t [KN/m3]	H [m]	D [m]	Qst [N/cm]	Strada asfaltata	P [KN]	φ	σ_z [kN/m ²]	WI [N/cm]	Cd	pd [N/m ²]	φ	WI1 [N/cm]	pv [N/m ²]	WI2 [N/cm]	WI [N/cm]
B01-B02	19	0.61	0.2	23.0	si	100.00	1.50	89.20	266.7	0.45	49050	1.50	0.0	22892.8	0.0	0.0
B02-D01	19	0.67	0.2	25.3	si	100	1.45	80.81	234.4	0.39	49050	1.45	0.0	19835.8	0.0	0.0
D01-C01	19	0.76	0.2	28.7	si	100	1.40	70.77	197.7	0.33	49050	1.40	0.0	16363.5	0.0	0.0
C01-PP	19	0.91	0.2	34.4	si	100	1.33	58.56	155.9	0.25	49050	1.33	0.0	12431.9	0.0	0.0

Verifica all'inflessione diametrale

Tratto	VERIFICA STATICA DELLA TUBAZIONE																	
	CALCOLO INFLESSIONE DIAMETRALE																	
	De	Qst [N/cm]	WI [N/cm]	Kx	D [cm]	s [cm]	r [cm]	SN [KN/m ²]	Et [N/cm ²]	I [cm ³]	Et*I [N*cm]	Es [N/cm ²]	Ka	Δa [cm]	Δy [cm]	$\Delta y/D$	$\Delta y/D$ lim	VERIFICA
B01-B02	2	23.02	266.72	0.103	20	0.6	9.71	8	341816	0.017	5850	960	0.75	0.0	0.64	3.20%	5.00%	POSITIVA
B02-D01	2	25.30	234.42	0.103	20	0.6	9.71	8	341816	0.017	5850	960	0.75	0.0	0.58	2.92%	5.00%	POSITIVA
D01-C01	2	28.72	197.72	0.103	20	0.6	9.71	8	341816	0.017	5850	960	0.75	0.0	0.52	2.61%	5.00%	POSITIVA
C01-PP	2	34.42	155.91	0.103	20	0.6	9.71	8	341816	0.017	5850	960	0.75	0.0	0.46	2.30%	5.00%	POSITIVA

La deformazione percentuale risulta sempre inferiore al valore limite del 5%.

Verifica all'instabilità e della sollecitazione di massima flessione

	VERIFICA STATICA DELLA TUBAZIONE													
	VERIFICA ALL'INSTABILITA' ELASTICA								CALCOLO DELLA SOLLECITAZIONE MASSIMA DI FLESSIONE					
Tratto	FS	Rw	H [cm]	B'	Hw [cm]	qa [N/cm ²]	Ris [N/cm ²]	VERIFICA	Df	σ [N/cm ²]	σ_{lim} [N/cm ²]	μ calcolato	μ min	VERIFICA
B01-B02	2.5	1.00	60.6	1.00	0.00	59.95	14.49	POSITIVA	4.5	1452.5	2'500	1.72	1.5	POSITIVA
B02-D01	2.5	1.00	66.6	1.00	0.00	59.95	12.99	POSITIVA	4.5	1323.7	2'500	1.89	1.5	POSITIVA
D01-C01	2.5	1.00	75.6	1.00	0.00	59.95	11.32	POSITIVA	4.5	1185.0	2'500	2.11	1.5	POSITIVA
C01-PP	2.5	1.00	90.6	1.00	0.00	59.95	9.52	POSITIVA	4.5	1043.8	2'500	2.40	1.5	POSITIVA

La pressione ammissibile q_a risulta sempre superiore alla risultante dei carichi esterni applicati R_{is} .

Il coefficiente di sicurezza μ per la sollecitazione massima di flessione risulta sempre superiore al valore minimo di 1.5.