

mipaft

ministero delle politiche agricole
alimentari, forestali e del turismo

FSC

Fondo per lo Sviluppo
e la Coesione

PROGRAMMA OPERATIVO AGRICOLTURA 2014 - 2020

Sottopiano 2 - Interventi nel campo delle Infrastrutture irrigue

C.U.P. E96J16001360009

CONSORZIO DI BONIFICA "VELIA"

Località Piano della Rocca, 84060 - PRIGNANO CILENTO (SA)

Tel. 0974/837206 - Fax. 0974/837154 - Pec: consorziovelia@pec.it - www.consorziovelia.com

COMPLETAMENTO IMPIANTO

IRRIGUO DELL'ALENTO

Sistema di distribuzione intersettoriale

(3° lotto di distribuzione - 1° stralcio)

Fatt. tecnico-economica

Progetto definitivo

Progetto esecutivo

Elaborato A5.3	Scala -	Data Settembre 2020	Revisione <input type="checkbox"/> 1 <input type="checkbox"/> 2 <input type="checkbox"/> 3 <input type="checkbox"/> 4 <input type="checkbox"/> 5 <input type="checkbox"/> 6
--------------------------	------------	------------------------	--

Oggetto

Verifica statica e di deformazione delle condotte

TIPOLOGIA ELABORATO	<input checked="" type="checkbox"/> Descrittivo	<input type="checkbox"/> Grafico	<input checked="" type="checkbox"/> Calcolo
<input type="checkbox"/> Economico	<input type="checkbox"/> Sicurezza	<input type="checkbox"/> Disciplinare - Contrattuale	<input type="checkbox"/> Altro

<p>PROGETTISTA Velia Ingegneria e Servizi Srl Loc. Piano Della Rocca 84060 - Prignano Cilento (SA) Tel. 0974/837206 - Pec: veliaingegneria@pec.it Ing. Gaetano Suppa Iscritto all'Albo degli Ingegneri di Salerno n. 1854 dal 12.09.1983</p> <p>GEOLOGO Dott. Geol. Francesco Peduto Iscritto all'Albo dei Geologi Regione Campania n. 2683 dal 06.05.1988</p>	<p>RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO Ing. Giancarlo Greco Iscritto all'Albo degli Ingegneri di Salerno n. 5168 dal 11.09.2006 Consorzio di Bonifica "Velia" Loc. Piano Della Rocca 84060 - Prignano Cilento (SA) Tel. 0974/837206 - Fax 0974/837154 - Pec: consorziovelia@pec.it</p>
--	--

Rif. archivio digitale - 15g.2020/Ve.Ing.

INDICE

1. PREMESSA.....	2
2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO	3
3. CALCOLI STATICI TUBAZIONI.....	4
3.1 LE AZIONI SULLE TUBAZIONI INTERRATE.....	5
3.1.1 Azione verticale dovuta al terreno di rinterro	5
3.1.2 Azione verticale dovuta ai sovraccarichi fissi e mobili	13
3.1.3 Azione verticale dovuta al peso della tubazione e al peso dell'acqua	16
3.2 DISTRIBUZIONE DELLE AZIONI E DELLE REAZIONI AGENTI SULLA TUBAZIONE.....	17
3.2.1 Azioni e reazioni verticali.....	17
3.2.2 Reazioni laterali orizzontali	18
3.3 VERIFICA ALLE MASSIME TENSIONI AMMISSIBILI.....	19
3.4 VERIFICA ALL'OVALIZZAZIONE DELLA TUBAZIONE	22
3.5 VERIFICA ALL'INSTABILITÀ ELASTICA PER DEPRESSIONE INTERNA	24
4. RISULTATI	25
4.1 TUBAZIONI IN PEAD	25

1. PREMESSA

Lo scopo delle verifiche riportate nella presente relazione è di accertare che le tubazioni in progetto siano in grado di resistere, con un adeguato margine di sicurezza, ai carichi agenti su di esse, rispettando le condizioni necessarie per il normale esercizio ed assicurandone la conservazione e la funzionalità nel tempo. La verifica statica di una tubazione interrata consiste, quindi, nel controllare che i carichi agenti sulla struttura provochino tensioni e deformazioni ammissibili, cioè compatibili con la geometria e il materiale della tubazione e con le esigenze di progetto e di funzionalità. Il criterio di verifica da adottare dipende dal comportamento della tubazione nei confronti della deformabilità, cioè dalla "elasticità in sito". Il comportamento statico di una tubazione interrata dipende dalla resistenza del materiale costituente la condotta, da quella del materiale che la circonda e da come quest'ultimo è sistemato, cioè dalla metodologia di posa e dalla tipologia dell'appoggio che concorrono a contrastare l'ovalizzazione del tubo.

MATERIALE	PN	DE	DI	SP
ACCIAIO	35	508	495,4	6,3
PEAD	16	110	90	10
PEAD	16	125	102,2	11,4
PEAD	16	140	114,6	12,7
PEAD	16	160	130,8	14,6
PEAD	16	180	147,2	16,4
PEAD	16	200	163,6	18,2
PEAD	16	225	184	20,5
PEAD	16	280	229,2	25,4
PEAD	16	355	290,6	32,2
PEAD	16	400	327,4	36,3
PEAD	16	450	368,2	40,9
PEAD	25	125	90,8	17,1
PEAD	25	140	101,6	19,2
PEAD	25	160	116,2	21,9
PEAD	25	180	130,8	24,6
PEAD	25	200	145,2	27,4
PEAD	25	250	181,6	34,2
PEAD	25	280	203,4	38,3
PEAD	25	315	228,8	43,1

Tabella 1 - Tubazioni oggetto di verifica

Le tubazioni sono state verificate nel rispetto delle massime tensioni ammissibili dei materiali, delle massime deformazioni (verifica all'ovalizzazione) e nel rispetto dell'instabilità elastica per depressione interna.

2. NORMATIVA DI RIFERIMENTO

La progettazione, la costruzione e il collaudo delle tubazioni sono regolati in Italia dalla "Normativa tecnica sulle tubazioni", contenuta nel Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici del 12.12.1985, pubblicata sul n.61 della GU del 14.3.1986.

Le Norme del DM LL.PP. del 12.12.1985, prevedono che il progetto debba comprendere l'esame dei diversi possibili schemi idraulici di funzionamento delle opere, sia durante l'esercizio che in fase di collaudo, in base a cui va effettuato il dimensionamento idraulico e statico delle tubazioni. Le verifiche di sicurezza delle tubazioni sono state effettuate in accordo alla Norma del DM 12.12.1985; questa definisce la pressione di esercizio p_E come il massimo valore della pressione p che può verificarsi in asse alla tubazione per il più gravoso funzionamento idraulico del sistema, comprese le eventuali sovrappressioni Δp , che si manifestano durante fenomeni transitori; in assenza di calcoli specifici, e in ogni caso per le reti di distribuzione con diametri fino a 350 mm, andrà assunto per il p , conseguente a manovre di regolazione del sistema, un valore di 2,5 Kgf/cm², indipendentemente dal tipo di tubazione impiegato. Le Norme prevedono che debba essere determinato lo stato di tensione dovuto a tutte le sollecitazioni, quali il peso proprio, il peso del terreno di rinterro, i sovraccarichi esterni (statici e dinamici), le variazioni termiche, le azioni sismiche ecc.; determinata la tensione massima di trazione, che si manifesta in un dato punto della sezione trasversale in conseguenza a tutte le sollecitazioni suddette, viene definita pressione equivalente p_0 la pressione assiale che conferisce al tubo tensioni di trazioni pari alla suddetta tensione massima (p_0 può essere calcolata con la ben nota formula di Mariotte).

Le Norme definiscono poi pressione nominale p_N della tubazione la somma delle pressioni di esercizio e di quella equivalente:

$$p_N = p_E + p_0$$

Si fa presente che la pressione equivalente p_0 risulta spesso trascurabile rispetto alla pressione di esercizio p_E , per cui la scelta della classe di pressione della tubazione può essere fatta in base alla p_E .

Ciò non accade, in genere, per le tubazioni di grande diametro e per quelle di tipo flessibile, nelle quali le sollecitazioni generano delle deformazioni non trascurabili e risulta perciò indispensabile prendere in esame tutte le azioni esterne, determinando la relativa pressione equivalente p_0 inoltre sommare alla p_E per ottenere la pressione nominale p_N .

La Normativa pone, poi, dei limiti alle sovrappressioni dinamiche di colpo d'ariete Δp in funzione della pressione idrostatica, indipendentemente dal tipo di materiale impiegato.

VALORE LIMITE DI SOVRAPRESSIONE ASSOCIATO ALLA PRESSIONE DI ESERCIZIO				
	[kgf/cm ²]			
Pressione idrostatica fino a	6	6 ÷ 10	10 ÷ 20	20 ÷ 30
Sovrapressione di colpo d'ariete	3	3 ÷ 4	4 ÷ 5	5 ÷ 6

*Tabella 2 – Sovrapressione massima di calcolo in funzione della pressione di esercizio.
Tabella estratta dagli allegati del DM 12.12.1985*

In fase di collaudo vanno eseguite prove di tenuta con una pressione $p_C = 1,5p_E$, con un valore minimo di $p_C = 1,5 p_E + 2 \frac{\text{Kgf}}{\text{cm}^2}$ (salvo maggiori valori indicati nel capitolato speciale d'appalto).

3. CALCOLI STATICI TUBAZIONI

I calcoli statici delle tubazioni sono stati effettuati seguendo le indicazioni del DM. LL. PP. del 12.12.1985, che consente di determinare la pressione nominale p_N cui sono sottoposte le tubazioni e i giunti, è necessario calcolare la pressione equivalente p_0 , da sommare alla massima pressione interna di esercizio p_E .

Come si è visto nel capitolo precedente, tale pressione equivalente p_0 è definita come quella pressione agente a livello dell'asse della tubazione che dà luogo in questa a tensioni di trazione pari alla tensione massima, che si verifica in un dato punto della tubazione, dovuta a tutte le sollecitazioni esterne, quali il peso proprio, il peso del terreno di rinterro, i sovraccarichi esterni statici e dinamici, le variazioni termiche, le spinte dovute alla eventuale presenza di acque di falda ecc. È perciò necessario determinare lo stato di sollecitazione indotto nella tubazione da tutte le azioni esterne, al fine di individuare il punto in cui si verifica la suddetta tensione massima di trazione calcolandone il valore.

Il problema è estremamente complesso, dipendendo le azioni agenti sui tubi e le sollecitazioni da esse indotte da una serie di elementi che è molto difficile conoscere e da altri di non semplice schematizzazione, per cui la risoluzione del problema è affetta da notevoli margini di incertezza, malgrado le numerose ricerche teoriche e sperimentali eseguite.

3.1 LE AZIONI SULLE TUBAZIONI INTERRATE

3.1.1 Azione verticale dovuta al terreno di rinterro

L'azione dovuta al terreno di ricoprimento è diversa a seconda delle condizioni di posa della tubazione e a seconda che questa sia flessibile o possa essere considerata indeformabile. Per quanto riguarda le condizioni di posa la NORMA UNI 7157/76 "Guida per la scelta della classe dei tubi per condotte di amianto-cemento sottoposte a carichi esterni e funzionanti con o senza pressione interna", distingue 4 condizioni di posa, schematicamente rappresentate nella Fig. 1. Le quattro condizioni di posa sono le seguenti:

- 1) posa in trincea stretta;
- 2) posa in trincea larga;
- 3) posa con rinterro indefinito;
- 4) posa in trincea stretta con rinterro indefinito.

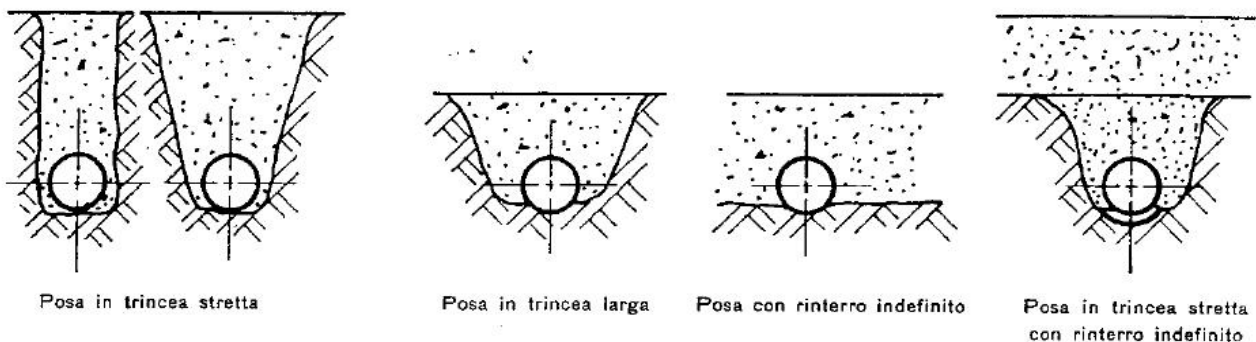


Figura 1 – Condizioni di posa dei tubi previste dalla NORMA UNI 7517/76

POSA IN TRINCEA STRETTA

La condizione di posa in trincea stretta si ha quando è verificata una delle due seguenti relazioni:

$$H \leq 1,5B \quad \text{per} \quad B \leq 2D \quad (1)$$

$$H \leq 3,5B \quad \text{per} \quad 2D < B < 3D \quad (2)$$

dove D è il diametro esterno della tubazione, B la larghezza della trincea di scavo in corrispondenza della generatrice superiore del tubo e H l'altezza del ricoprimento sopra tale generatrice. La larghezza raccomandata da normativa per la trincea a livello della generatrice inferiore del tubo è all'incirca $D + 0,5$ m, essendo D il diametro esterno del tubo, in m.

Nel caso di posa in trincea stretta occorre distinguere i tubi deformabili da quelli rigidi; i primi si deformano più del terreno circostante e ciò si verifica quando è soddisfatta la:

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

essendo E_s e E_t i moduli di elasticità rispettivamente del terreno di posa e del tubo, s lo spessore e R il raggio mediano del tubo ($R = R_i + s/2$). Se invece il coefficiente n definito dalla (3) risulta minore di 1, il tubo è da considerare indeformabile. Il valore del modulo elastico del terreno di trincea dipende dal grado di compattazione del materiale stesso e dalla tipologia (terreni a grana fine o più grossolani) e possono essere stimati dalla tabella di seguito riportata.

TIPO DI MATERIALE CHE AVVOLGE LA TUBAZIONE	Valore di E' in funzione del grado di compattazione del materiale che avvolge la tubazione [N/cm ²]			
	Scaricato alla rinfusa	Costipamento leggero < 85% PROCTOR < 40% DENSITA' REL.	Costipamento moderato 85-95% PROCTOR 40-70% DENSITA' REL.	Costipamento elevato > 95% PROCTOR > 70% DENSITA' REL.
a - terreni a grana fine, con meno del 25% di particelle di grana grossolana; plasticità da media a nulla.	34	140	280	690
b - terreni a grana fine, con più del 25% di particelle a grana grossolana; plasticità da media a nulla. Terreni a grana grossolana con più del 12% di fini.	69,0	280	690	1380
c - terreni a grana grossolana con pochi fini o nessuno (<12% di fini).	140	690	1380	2070
d - roccia frantumata.	690	-	2070	-
<p>Appartengono al gruppo a i seguenti terreni: argille inorganiche con plasticità da bassa a media - limo organico - sabbia molto fine</p> <p>Appartengono al gruppo b i seguenti terreni: quelli del gruppo a, ma con più del 25% di particelle di grana grossolana - miscele di ghiaia, sabbia e limo (o argilla) mal graduate - sabbie con limo.</p> <p>Appartengono al gruppo c i seguenti terreni: misure di ghiaia e sabbia con pochi fini o nessuno - sabbie ghiaiose con pochi fini o nessuno.</p>				

Tabella 3 - Valori medi del modulo elastico E' del suolo in funzione del tipo di suolo e del grado di costipamento

Per tubi deformabili posati in trincea stretta, il terreno di ricoprimento esercita, per unità di lunghezza del tubo, un'azione verticale P_v che, secondo Marston, è data dalla:

$$P_v = c_t \gamma_t D B \quad (4)$$

nella quale D e B hanno il significato visto in precedenza, γ_t è il peso specifico del terreno di rinterro e c_t il coefficiente di carico del terreno nella posa in trincea stretta; tale coefficiente si ricava dai diagrammi riportati in Fig.2.

Le curve che danno i valori di c_t sono tracciate per differenti valori dell'angolo di attrito interno del terreno; quindi si deve scegliere la curva appropriata in base al tipo di terreno.

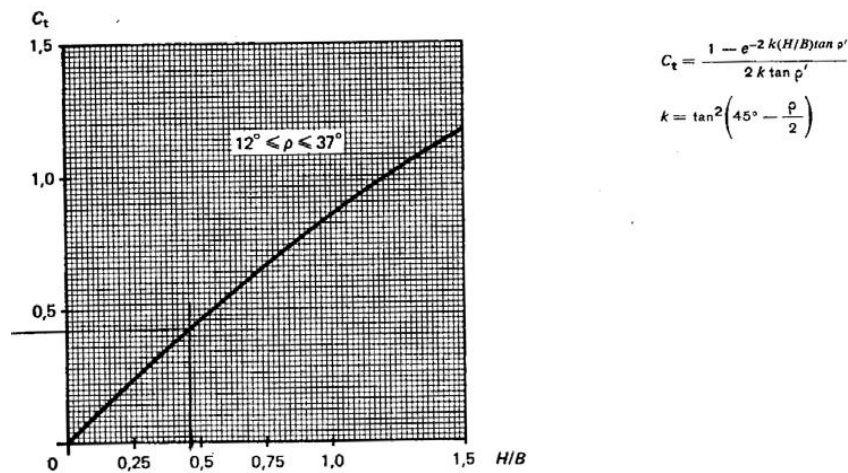
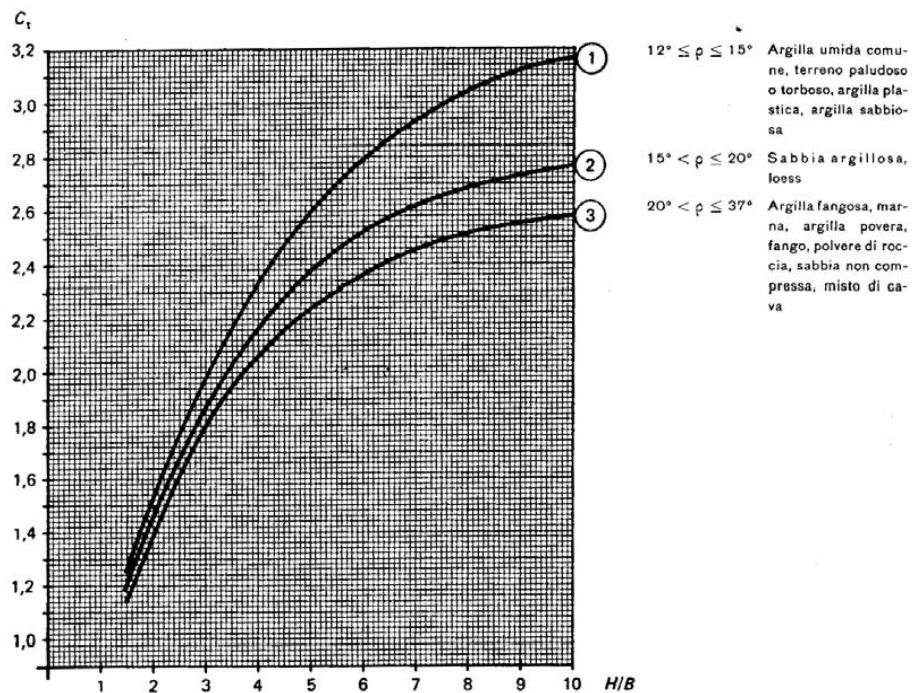


Figura 2 - Coefficiente di Marston in funzione di H/B

In Fig. 2 sono riportate alcune equazioni per ricavare, senza l'ausilio dei grafici, il valore del coefficiente c_t . Per tubi rigidi ($n < 1$) in trincea stretta, l'azione P_v del terreno di ricoprimento, sempre per unità di lunghezza di tubazione, è invece data dalla:

$$P_v = c_t \gamma_t B^2 (5)$$

La formula restituisce lo scarico in kg/m, esprimendo il γ in kg/m³ e B in metri. Il valore del coefficiente c_t , nel caso di tubazione rigida, si può ricondurre a quello ricavato per le tubazioni deformabili; in conclusione è possibile utilizzare gli stessi tipi di grafici.

POSA IN TRINCEA LARGA E POSA CON RINTERRO INDEFINITO

Nel caso di trincea larga e per posa in rinterro indefinito il carico dovuto al rinterro è calcolabile tramite la formula:

$$P_v = c_e \gamma_t D^2 (6)$$

La formula restituisce lo scarico in kg/m, esprimendo il γ in kg/m³ e D in metri. Si ricorda che un tubo è posato in trincea larga quando non sono rispettate le relazioni tra B , D , H indicate nelle (1) e (2), vedi Fig. 3 riportata di seguito.

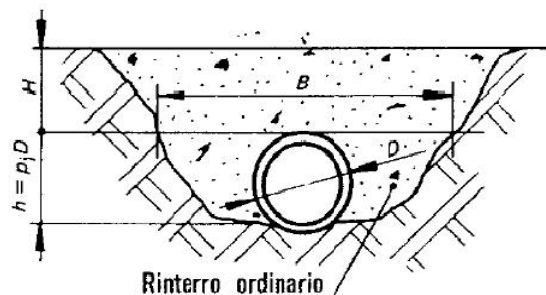


Figura 3 - Posa in trincea larga

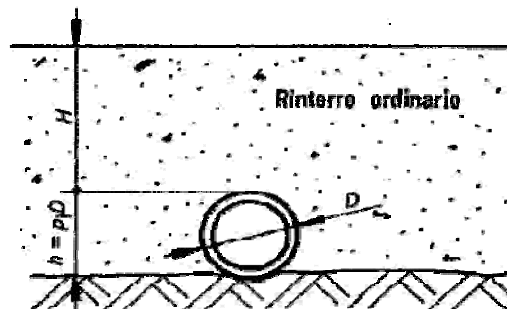


Figura 4 - Posa con rinterro indefinito

Si dice, invece, che un tubo è posato con rinterro indefinito quando lo scavo è poco profondo, in terreno naturale, e quando è ricoperto quasi interamente da terreno di riporto di tipo naturale, solitamente lo stesso terreno di scavo (vedi Fig. 4). Il grafico da cui ricavare il coefficiente c_e per i sopracitati tipi di posa è il seguente (Fig. 5):

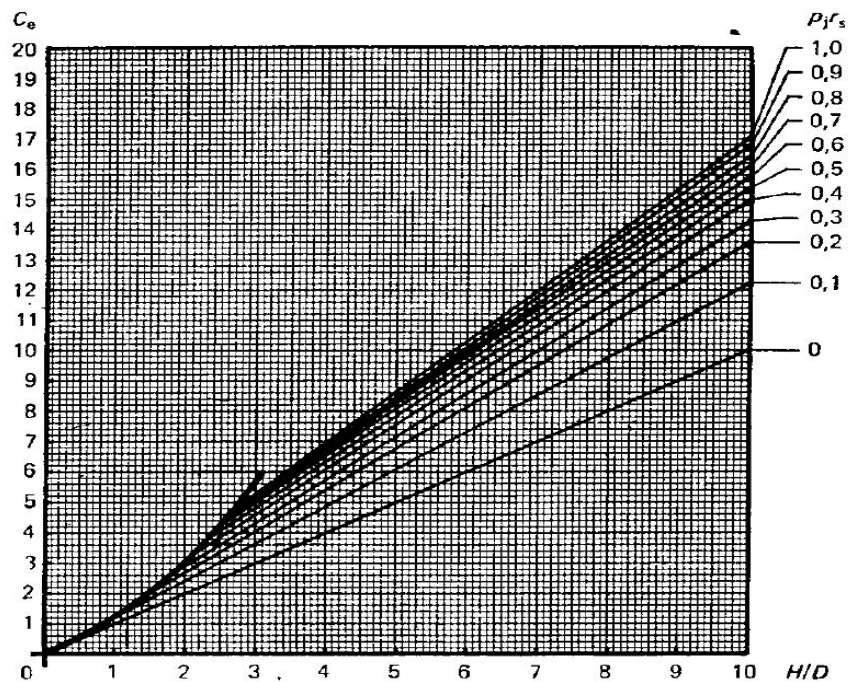


Figura 5 – Valori del coefficiente c_e per posa in trincea larga e per posa con rinterro indefinito

Si ricorda che le curve della Fig. 5, che danno il valore di c_e , sono tracciate:

- per un angolo di attrito interno del terreno pari a 31° , cioè per un terreno sabbioso non stabilizzato. I valori di c_e sono perciò più bassi nel caso di un angolo di attrito interno minore di 31° . Tuttavia i valori del coefficiente c_e ricavabili dal grafico possono ritenersi accettabili, cioè affetti da un errore ridotto, anche nel caso di terreni con angolo di attrito interno diverso da quello sopraindicato.
- per il valore del prodotto $p_j \cdot r_s$. Il valore p_j è il rapporto di proiezione, ricavabile come h/D (vedi figura 3 e 4), che dipende dall'angolo di appoggio della tubazione; il coefficiente r_s rappresenta il tasso di assestamento, che risulta essere un fattore empirico che rispecchia i differenti assestamenti della tubazione e del terreno che avvolge quest'ultima. Il coefficiente r_s assume valore pari a 1 per qualsiasi terreno nella posa in trincea larga, mentre nel caso di rinterro indefinito varia al variare del tipo di terreno di posa:
 - $r_s = 1$ per roccia o terreno stabilizzato;
 - $r_s = 0,8 \div 0,5$ per terreni ordinari;
 - $r_s = 0,5 \div 0$ per terreni friabili.

POSA IN TRINCEA STRETTA CON RINTERRO INDEFINITO

Una condotta si dice posata in trincea stretta con rinterro indefinito quando è posata in uno scavo stretto interrato fino al livello del terreno naturale, mentre lo stesso è ricoperto con terreno di tipo ordinario fino ad una determinata altezza (vedi Fig. 6).

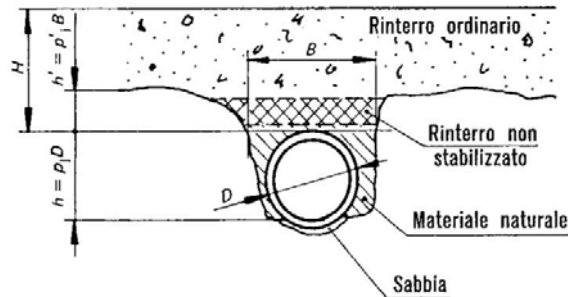


Figura 6 – Posa in trincea stretta con rinterro indefinito

In queste condizioni di posa l'espressione per il calcolo dell'azione verticale è uguale a:

$$P_v = c_n y_t B^2 (7)$$

dove c_n è un coefficiente ricavabile dai diagrammi qui di seguito riportati (Fig. 7), la formula restituisce lo scarico in kg/m, esprimendo il γ in kg/m³ e B in metri.

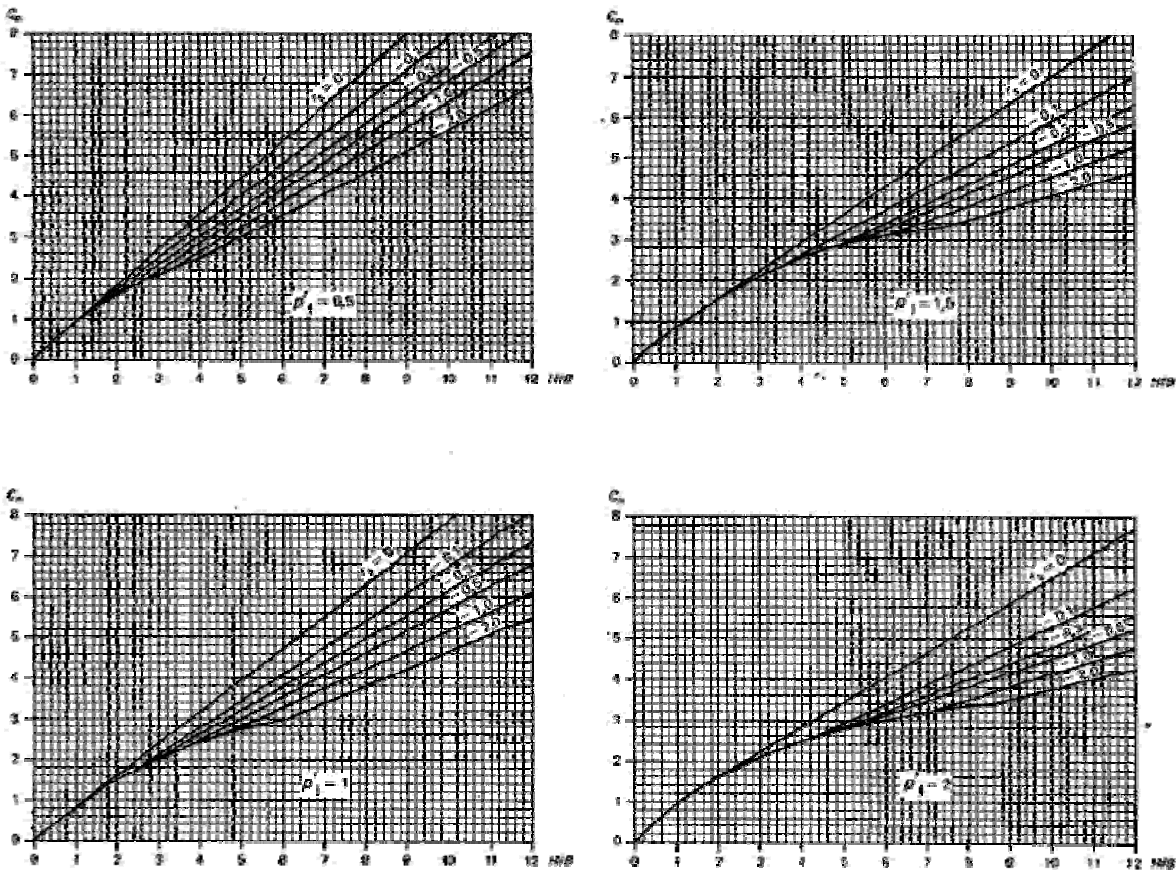


Figura 7 - Posa in trincea stretta con rinterro indefinito (coefficiente c_n)

Si ricorda che le curve della Fig. 7, che danno il valore di c_n , sono tracciate:

- per un angolo di attrito interno del terreno pari a 12°, cioè per argilla umida. I valori di c_n sono perciò più bassi nel caso di un angolo di attrito interno minore di 12°. Tuttavia i valori del coefficiente c_n ricavabili dal grafico possono ritenersi accettabili, cioè affetti da un

errore ridotto, anche nel caso di terreni con angolo di attrito interno diverso da quello sopraindicato.

- sotto forma di quattro grafici, ognuno valevole per un valore di p'_j . I valori di questo coefficiente sono ricavabili attraverso la relazione:

$$p'_j = h' / B \quad (8)$$

dove il valore di h' è desumibile dalla Fig. 6.

Il coefficiente r_s , che ancora rappresenta il tasso di assestamento, risulta dipendere sia dalla deformabilità del tubo stesso che del terreno di posa. Nel caso di trincea stretta con rinterro indefinito risulta conveniente assumere:

- $r_s = 0$ per tubi flessibili;
- $r_s = -0,1 \div -0,5$ per tubi rigidi in terreni poco deformabili;
- $r_s = -0,5 \div -2$ per tubi rigidi in terreni cedevoli.

3.1.2 Azione verticale dovuta ai sovraccarichi fissi e mobili

Le tubazioni destinate ad essere posate sotto strada devono spesso sopportare dei sovraccarichi verticali fissi e/o mobili, il cui effetto si somma alla pressione interna, se presente, e del carico del rinterro. Questi sovraccarichi, concentrati o distribuiti su una certa superficie, si distribuiscono lungo la verticale con una certa legge, dando luogo, ad una certa profondità, ad una data distribuzione delle pressioni verticali.

SOVRACCARICHI VERTICALI FISSI, CONCENTRATI O DISTRIBUITI

I sovraccarichi fissi, concentrati o distribuiti su una certa superficie si diffondono lungo la verticale con una certa legge, dando luogo, alla profondità z della generatrice superiore della tubazione a una data distribuzione delle pressioni verticali; per esempio un carico concentrato P si distribuisce lungo la verticale secondo una superficie conica le cui generatrici formano, rispetto alla verticale, un angolo α che dipende dalle caratteristiche del terreno (in prima approssimazione può assumersi $\alpha = 40-45^\circ$). Quindi alla profondità z il carico P risulta distribuito su una superficie circolare di raggio

$R = z \operatorname{tg} \alpha$ per cui l'intensità del carico distribuito risulta:

$$p_z = \frac{P}{\pi(z \operatorname{tg} \alpha)^2} \quad (9)$$

A volte si ipotizza che il carico P si distribuisca lungo la verticale secondo un angolo $\alpha=39,23^\circ$ per cui la (9) diviene:

$$p_z = \frac{3P}{2\pi z^2} \quad (10)$$

Di tale distribuzione di pressione andrà effettivamente a interessare la tubazione quella parte che grava sulla superficie rettangolare di larghezza pari al diametro esterno D_E di quest'ultima e di lunghezza pari a $l = 2r = 2z \operatorname{tg}\alpha$.

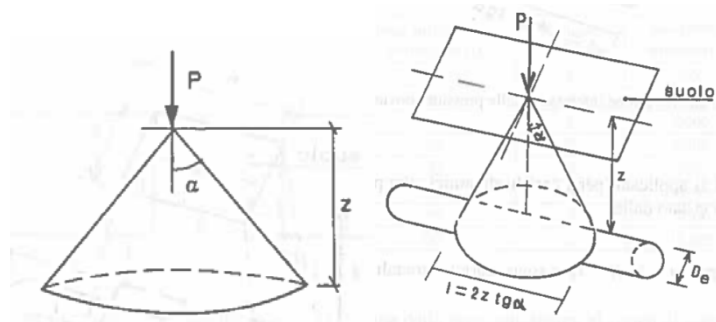


Figura 8 - Distribuzione delle pressioni dovute a carico concentrato e distribuito

Analogamente si procede per determinare le sollecitazioni dovute ad un carico p uniformemente distribuito sul suolo su una certa superficie rettangolare di dimensioni a (secondo la direzione della sezione trasversale della tubazione) e b (secondo la direzione longitudinale della tubazione): si tratta in questo caso di seguire il procedimento sopra indicato per ciascuno dei vertici di detta superficie, per cui alla profondità z tale carico risulta distribuito su una superficie rettangolare di dimensioni $A=(a+2z \operatorname{tg}\alpha)$ e $L=(b+2z \operatorname{tg}\alpha)$, e quindi l'intensità p_z si riduce al valore:

$$p_z = p \frac{ab}{(a + 2z \operatorname{tg}\alpha)(b + 2z \operatorname{tg}\alpha)} \quad (11)$$

Anche in questo caso, della superficie su cui agisce il carico di intensità p_z andrà considerata solo quella parte che grava sulla tubazione P_z , costituita da un rettangolo di larghezza pari al diametro esterno D_E e lunghezza $L=(b+2z \operatorname{tg}\alpha)$.

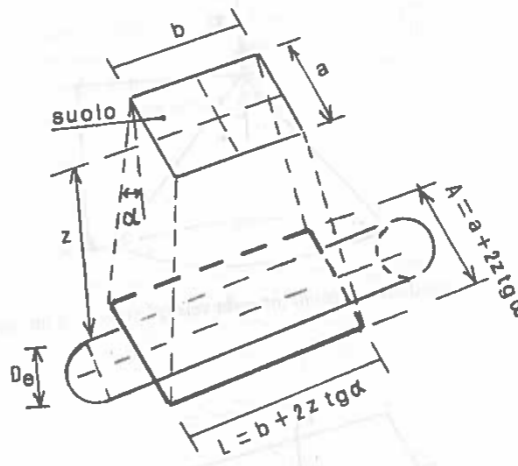


Figura 9 - Superficie di una tubazione interessata dalle pressioni dovute ad un carico distribuito

SOVRACCARICHI VERTICALI MOBILI CONCENTRATI

In genere, si considerano i sovraccarichi mobili dovuti al transito previsti dalle apposite normative a seconda del tipo di traffico e formate dal convoglio di più assi, calcolando le pressioni totali agenti alla quota della generatrice superiore come somma delle pressioni dovute ai vari assi del convoglio.

I convogli tipo sono costituiti da due tipologie di autocarro: pesante HT costituito da tre assi di ruote e leggero LT, costituito da due assi di ruote disposti secondo la figura successiva. I convogli tipo HT sono suddivisi in 5 classi, quelli tipo LT in 3 classi e hanno le caratteristiche riportate nella tabella seguente:

Simbolo convoglio	Peso totale P del convoglio (t)	Numero degli assi	Sovraccarico della ruota (Kgf)	
			Anteriore P_a	Posteriore P_p
LT 3	3	2	500	1000
LT 6	6	2	1000	2000
LT 12	12	2	2000	4000
HT 26	26	2	6500	6500
HT 30	30	3	5000	5000
HT 38	38	3	6250	6250
HT 45	45	3	7500	7500
HT 60	60	3	10.000	10.000

Figura 10 - Caratteristiche dei convogli tipo LT e HT

Da Deppo e Altri (2000) hanno fatto una trattazione completa sull'argomento considerando le condizioni di condotta posata lungo al linea mediana degli assi del

convoglio o lungo l'allineamento longitudinale delle ruote dei diversi assi. In base ad un'indagine numerica sono pervenuti alla conclusione che la pressione totale p_z può essere espressa in funzione della profondità z del sovraccarico per ruota del convoglio, dalle formule:

$$p_z = 0.5281 \frac{P}{z^{1.0461}} \quad (12)$$

$$p_z = 0.8743 \frac{P_a}{z^{1.5194}} \quad (13)$$

Nelle formule la profondità z è espressa in metri e le unità di misura di P e di p_z devono essere tali che il rapporto p_z/P sia espresso in m^{-2} .

Il carico complessivo uniformemente distribuito agente su un tratto di tubazione di lunghezza 1 metro P_{vz} risulta ovviamente pari a $p_z D_E$.

3.1.2 Azione verticale dovuta al peso della tubazione e al peso dell'acqua

Il peso proprio della tubazione per unità di lunghezza di tubazione è dato da:

$$P_{tub} = \gamma_{tub} \pi (D_E - s) s \quad (14)$$

Esprimendo γ_m in kg/m^3 e D_E in m , il valore di P_{tub} così calcolato rappresenta lo scarico in kg/m del peso del tubo per unità di lunghezza dello stesso. Tale valore sarà utile al calcolo delle reazioni laterali del terreno. Mentre ai fini del calcolo delle tensioni che si hanno nel materiale, il peso del tubo va considerato uniformemente distribuito lungo lo sviluppo circonferenziale medio del tubo pari a $\pi(D_E - s)$, e quindi:

$$p_p = \gamma_{tub} s \quad (15)$$

Stesso discorso vale per l'azione dell'acqua contenuta nella tubazione, ai fini del calcolo delle reazioni laterali del terreno è utile stimare lo scarico a metro lineare di tubazione pari a:

$$P_{acqua} = \gamma_w \pi r^2 * 1m \quad (16)$$

Per il calcolo dei momenti dovuto al peso del liquido contenuto nella tubazione sarà invece utile la relazione:

$$p_w = \frac{1}{2} \gamma_w D \quad (17)$$

Quest'ultima ricavabile considerando che il liquido esercita sulle due metà della tubazione, suddivise dal piano di simmetria verticale, delle pressioni unitarie di andamento triangolare, con valore nullo in sommità e pari a γD sul fondo. Le sollecitazioni e le

deformazioni della tubazione prodotte dai suddetti diagrammi delle pressioni unitarie differiscono in misura molto lieve da quelle dovute a diagrammi delle pressioni unitarie rettangolari, di intensità pari a p pari a quella media dei diagrammi triangolari, cioè $p = \frac{1}{2} \gamma D$.

3.2 DISTRIBUZIONE DELLE AZIONI E DELLE REAZIONI AGENTI SULLA TUBAZIONE

3.2.1 Azioni e reazioni verticali

Secondo De Saedeleer, l'azione verticale complessiva per unità di lunghezza di tubazione, dovuta al terreno di ricoprimento e ai sovraccarichi fissi e mobili per posa in trincea stretta si distribuirebbe uniformemente sulla corda AB superiore di tubazione che sottende un angolo al centro di 90° , dando luogo alla pressione verticale:

$$p_v = \frac{P_{vert,tot}}{AB} = \frac{P_v + P_{vz} + P_z}{\frac{D}{\sqrt{2}}} \quad (18)$$

Per posa con rinterro indefinito si può invece ritenere che la $P_{vert,tot}$ si distribuisca su una striscia di larghezza D, originando la seguente pressione verticale uniforme p_v :

$$p_v = \frac{P_{vert,tot}}{D} = \frac{P_v + P_{vz} + P_z}{D} \quad (19)$$

Per posa in trincea larga e in trincea stretta con rinterro indefinito si hanno condizioni intermedie tra le due considerate sopra e si può assumere un valore di p_v intermedio.

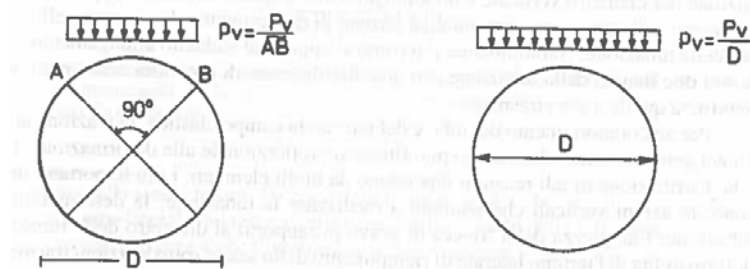


Figura 11 – Azioni verticali secondo la Teoria di De Saedeleer

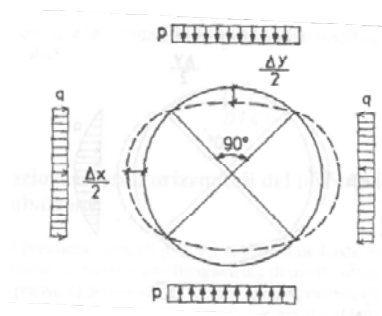
Alla pressione p_v reagisce la parte inferiore della tubazione con una pressione diretta verso l'alto p'_v , in maniera che dipende dalla sua deformabilità e dalle condizioni di appoggio che possono essere diverse. Per le tubazioni flessibili può ritenersi soddisfacente l'approccio per il quale l'arco inferiore reagente sottenda anch'esso un angolo al centro pari a 90° , inoltre volendo prescindere per semplicità di calcolo dagli scarichi del tutto eseguiti a metro lineare della tubazione e dell'acqua, ne diviene che:

$$p'_v = p_v \quad (20)$$

3.2.2 Reazioni laterali orizzontali

Per effetto delle pressioni verticali p_v e p'_v la tubazione tende ad ovalizzarsi, con una riduzione del diametro verticale e un allungamento di quella orizzontale, per cui vengono trasmesse delle pressioni orizzontali del terreno di riempimento che si trova nello scavo ai lati della tubazione. Una teoria che schematizza in maniera semplice il comportamento statico estremamente complesso delle tubazioni interrato è quello di De Saedeleer, secondo cui la reazione orizzontale uniforme q del terreno, che si ha per effetto delle azioni trasmesse dal tubo, è proporzionale alla deformazione x del terreno stesso:

$$q = K \frac{\Delta x}{2} \quad (21)$$



essendo K un coefficiente di rigidità del terreno, pari alla pressione orizzontale che occorre applicare al terreno di rinterro per produrre una deformazione unitaria. Il coefficiente K presenta un campo di variazione molto ampio (da 5 a 120 N/cm³), in funzione della profondità e delle caratteristiche del terreno. Per tubi interrati, con ricoprimento di altezza z rispetto all'asse del tubo variabile da 1 a 5 m, si può ritenere:

$$K = (5 \div 25)z$$

con z espresso in m e K in N/cm³. I valori più elevati del coefficiente moltiplicativo di z si potranno assumere solo per rinterri molto ben costipati, tuttavia, anche in questo caso, per tener conto della diminuzione di tale coefficiente nel tempo, è conveniente, cautelativamente, attenersi a valori sensibilmente minori di 25.

Esplicitando con vari passaggi il termine al secondo membro dell'equazione (21) è possibile pervenire alla seguente formula valida sia per trincea stretta che larga:

$$q = \frac{p}{1,07 + 13,70 \frac{EJ}{KR^4}} = \frac{P_v + P_{vz} + P_z + P_{tub} + P_{acqua}}{1,07 + 13,70 \frac{EJ}{KR^4}} \quad (22)$$

dove:

- E= modulo di elasticità normale del materiale del tubo (N/cm²)
- p = pressione agente sulle corde inferiori e superiori del tubo (Kg/m)
- J= momento di inerzia di un tratto di parete di tubazione lungo 1 cm (s³/12)
- R= raggio mediano del tubo (cm) (D_e-s)/2
- K= coefficiente di rigidità (N/cm²)

Per il calcolo delle reazioni laterali del terreno si considerano, solitamente, anche i pesi della tubazione e dell'acqua in essa contenuta.

3.3 VERIFICA ALLE MASSIME TENSIONI AMMISSIBILI

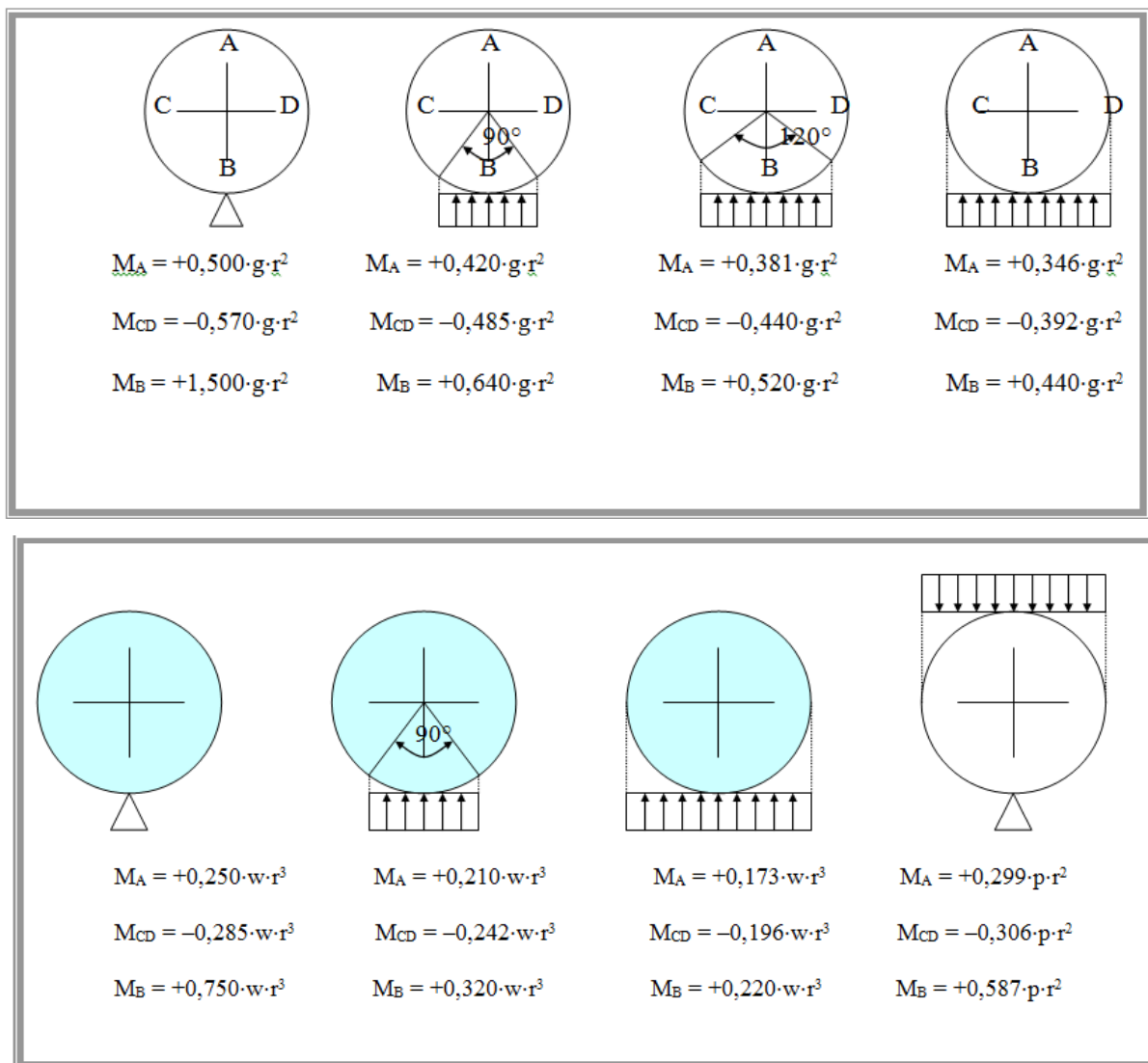
Una volta calcolate tutte le sollecitazioni dovute a forze esterne in precedenza esaminate e a eventuali altre, devono essere calcolate, con i consueti metodi della scienza delle costruzioni, il momento flettente M, il taglio T e lo sforzo normale N nelle sezioni verticali estreme della tubazione. In genere le tensioni nel materiale dovute a N e T sono trascurabili rispetto a quelle dovute a M. Le verifiche di sicurezza vanno effettuate per varie condizioni di carico possibili, che si hanno nelle seguenti tre situazioni:

- o tubazione vuota;
- o tubazione piena non in pressione (condizioni che si verificano durante la fase di riempimento e svuotamento);
- o tubazione piena con la pressione p_E .

Di queste tre situazioni la più critica è sempre la terza, anche nel caso in cui la pressione di esercizio dovesse essere molto limitata. Infatti, rispetto alle prime due situazioni, nella terza situazione la massima tensione di trazione nel materiale risulta sempre notevolmente maggiore, mentre è un po' minore la tensione di compressione; ma ciò ha poca importanza in quanto con la verifica alla depressione interna, che è consigliabile effettuare, si trovano compressioni molto elevate rispetto a quelle delle prime due situazioni indicate. In conclusione si dovrà eseguire solo la verifica alla terza situazione seguendo le direttive previste dal D.M. 12.12.1985.

Andrà quindi determinato lo sforzo σ di trazione massimo, che si avrà in un determinato punto; da tale sforzo sarà quindi possibile risalire tramite la ben nota formula di Mariotte alla pressione complementare p_0 , dovuta a tutte le azioni esterne, che sommata alla pressione di esercizio p_E , consente la determinazione della pressione nominale p_N , in base a cui deve essere commisurata la resistenza della tubazione.

Per le tubazioni in acciaio, vengono confrontati direttamente i valori delle tensioni risultanti con quelle ammissibili. Gli schemi di carico usualmente adottati per il calcolo sono i seguenti:



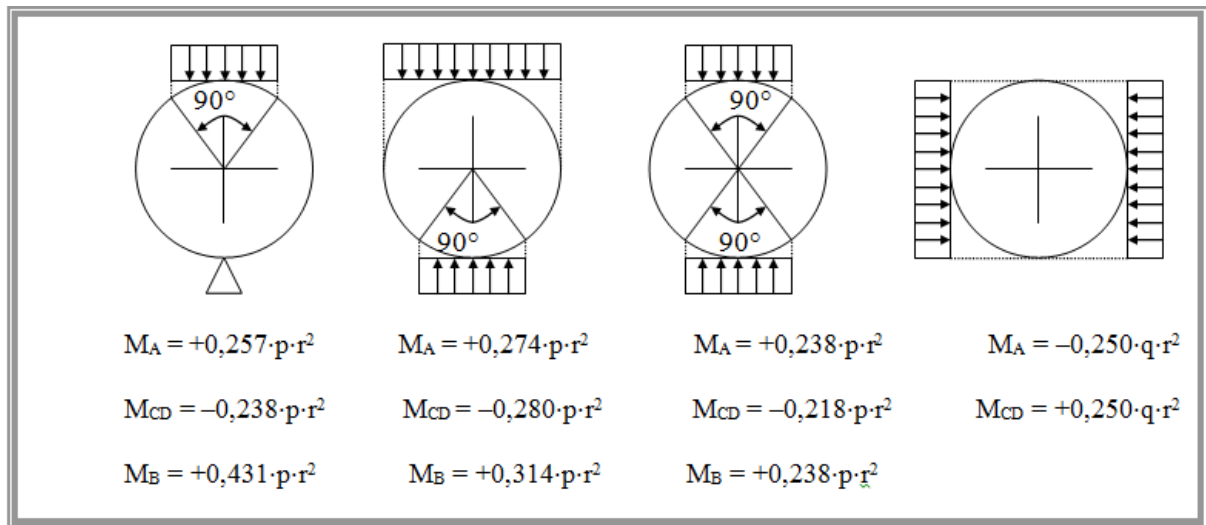


Figura 12 – Schemi generali per il calcolo dei momenti

Nelle tre figure sono considerati positivi i momenti che tendono la fibra interna; inoltre:

- w = peso specifico del liquido;
- p = carico per unità di superficie;
- q = spinta laterale per unità di superficie;
- $g = \gamma_{\text{tubo}} \cdot s$ = peso unitario della parete;
- s = spessore.

Dall'esame di tali figure si possono ricavare le sollecitazioni massime nella parete metallica come:

$$\sigma = \frac{M}{W_x} \quad [\text{kg/cm}^2]$$

dove:

- M = massimo momento flettente [kg·cm/cm]

- $W_x = \frac{1 \text{ cm} \cdot s_0^2}{6}$ [cm³] = modulo di resistenza della sezione per unità di lunghezza

ovvero, in caso di concomitanza di più carichi:

$$\sigma = \frac{\sum_i M_i}{W_x}$$

In particolare per la verifica a tubazione piena, interrata e sottoposta alla pressione di esercizio saranno calcolate le tensioni della tubazione a partire dal calcolo dei momenti nei punti A, C, D e B, identificati con:

- M_1 i momenti derivanti dall'applicazione dei carichi verticali p e p' ;
- M_2 i momenti derivanti dall'applicazione delle reazioni laterali del terreno q ;
- M_3 i momenti derivanti dal peso proprio della tubazione p_p ;
- M_4 i momenti derivanti dal peso dell'acqua contenuta nella tubazione p_w .

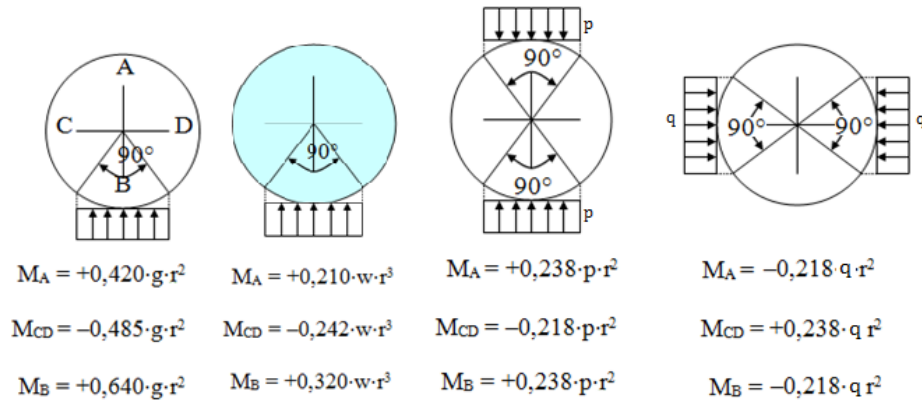


Figura 12 – Schemi utilizzati per il calcolo dei momenti (rispettivamente da sinistra M_1 , M_2 , M_3 e M_4) con $g=p_p$

3.4 VERIFICA ALL'OVALIZZAZIONE DELLA TUBAZIONE

Oltre alle verifiche alle tensioni ammissibili, occorre effettuare anche quelle relative alle massime deformazioni che, per le tubazioni interrato di tipo flessibile, possono a volte risultare più critiche.

L'esigenza di limitare le deformazioni scaturisce dal fatto che queste, se superano certi limiti, possono dar luogo a una riduzione della portata liquida non trascurabile e alterano lo stato delle sollecitazioni, col manifestarsi di tensioni superiori a quelle determinate in campo elastico nell'ipotesi di validità del principio della sovrapposizione degli effetti; elevate deformazioni possono inoltre danneggiare qualche tipo di rivestimento di cui sono dotate alcune tubazioni (per esempio i rivestimenti in malta cementizia e vernici rigide).

La verifica all'ovalizzazione non pone ovviamente alcun problema per le tubazioni che si comportano come rigide. In generale l'accorciamento del diametro verticale e l'allungamento del diametro orizzontale differiscono molto poco tra loro, per cui per la verifica è sufficiente controllare il valore di quest'ultimo. La condizione più critica si ha per tubazione vuota, in quanto l'effetto globale del liquido contenuto nel tubo si traduce in pressioni laterali dirette dall'interno verso l'esterno, che tendono a ridurre l'ovalizzazione della tubazione.

Solitamente la massima deformazione orizzontale Δx_2 viene molto spesso determinata mediante la formula di Spangler, che si basa sull'ipotesi che i carichi verticali permanenti e i sovraccarichi diano luogo a pressioni verticali in sommità e alla base del tubo uniformemente distribuite sull'intero diametro orizzontale e che le reazioni orizzontali agiscano con andamento parabolico sulle corde verticali che sottendono angoli al centro di 100° :

$$\Delta x_2 = \frac{K_s (f_r P_v + P_s)}{\frac{EJ}{R^3} + 0,061 E_s}$$

in cui

- P_v = carico verticale permanente agente sulla tubazione per unità di lunghezza;
- P_s = sovraccarico agente sulla tubazione per unità di lunghezza;
- K_s = coefficiente di appoggio, dipendente dalle condizioni di posa del tubo;
- f_r = fattore di ritardo d'inflessione, che tiene conto dell'assestamento del terreno nel tempo;
- $R = (D_E - s)/2$ = raggio mediano del tubo
- E, E_s = modulo elastico rispettivamente del tubo e del terreno
- f_r è il fattore di ritardo d'inflessione, che tiene conto dell'assestamento del terreno nel tempo; in particolare varia in funzione del grado di costipamento del terreno di riempimento.

TIPO DI RINTERRO E DI GRADO DI COSTIPAMENTO	f_r
Materiale con grado di costipamento elevato	2,0
Materiale con grado di costipamento moderato	1,60 ÷ 1,80
Materiale con grado di costipamento leggero (scarso)	1,30 ÷ 1,50
Materiale scaricato alla rinfusa	1,0 ÷ 1,20

Tabella 4 - Fattore di ritardo in funzione del materiale di rinterro e del suo costipamento

TIPO D'INSTALLAZIONE	ANGOLO EQUIVAL. DI LETTO [gradi]	COEFFICIENTE K_s [/]
Fondo sagomato con materiale di riempimento ben costipati ai fianchi del tubo (densità Proctor $\geq 95\%$) o materiale di letto e rinfranco di tipo ghiaioso leggermente costipato (densità Proctor $\geq 70\%$)	180	0,083
<i>Tubo posato su letto compatto di almeno 0,10 m di spessore e rinterro compatto fino alla generatrice superiore</i>	90 + 150	0,085
<i>Tubo posato su letto non compatto di almeno 0,10 m di spessore e rinterro compatto fino alla generatrice superiore</i>	60 + 90	0,096
Fondo sagomato con materiale di riempimento moderatamente costipato ai fianchi del tubo (densità Proctor $\geq 85\%$ e $< 95\%$) o materiale di letto e rinfranco di tipo ghiaioso [tubo posato su letto non compatto di almeno 0,10 m di spessore e rinterro leggermente compatto fino alla generatrice superiore]	45 + 60	0,103
<i>Assenza del letto di posa e rinterro compatto fino all'asse del tubo</i>	30 + 45	0,105
Fondo sagomato con materiale di riempimento sciolto posato ai fianchi del tubo (non raccomandato) [assenza di letto di posa e materiale di rinterro non compatto]	0 + 30	0,11

Figura 13 - Coefficiente di appoggio K_{sin} in funzione dell'angolo di appoggio e del tipo di installazione

3.5 VERIFICA ALL'INSTABILITÀ ELASTICA PER DEPRESSIONE INTERNA

Una tubazione sottoposta a una pressione esterna p_e , maggiore della pressione interna p_i , e quindi una depressione $\Delta p = p_e - p_i$, è soggetta a sforzi di compressione che tendono a instabilizzarla. Secondo la formula di Eulero, la pressione critica p_{cr} è data dalla:

$$p_{cr} = \frac{2E}{1 - \nu^2} \left(\frac{s}{D} \right)^3$$

con ν coefficiente di Poisson pari a 0,3 e D diametro medio.

Per la verifica a depressione interna nelle tubazioni interrato, si tiene conto anche della tensione di compressione dovuta al peso del rinterro P_v e al peso dei sovraccarichi, per cui risulta:

$$\frac{\Delta p D_E}{2s} + \frac{(P_v + P_s)}{2s} \leq \frac{\sigma_{cr}}{\nu_s}$$

Con $\sigma_{cr} = \frac{p_{cr} D_E}{2s}$ e v_s coefficiente di sicurezza da assumersi almeno pari a 2. Solitamente è soddisfacente supporre ai fini di tale verifica che la massima differenza tra pressione esterna e quella interna Δp possa essere pari a 0.8 kgf/cm².

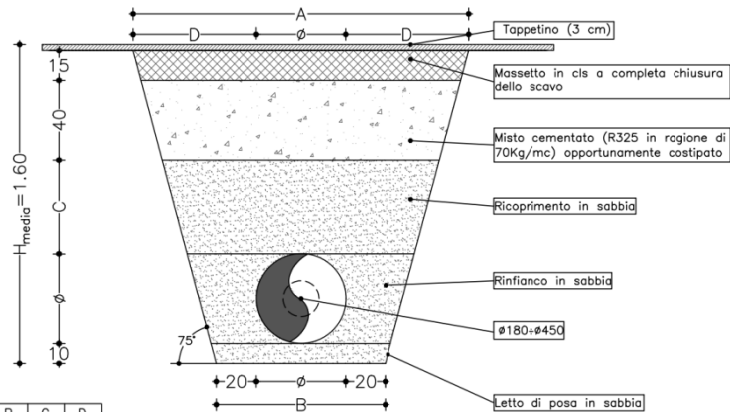
4. RISULTATI

4.1 TUBAZIONI IN PEAD

4.1.1 Tubazioni in PEAD PN 16

D_e	D_i	s	h_{smax}	H	B	$2D$	$3D$	$1.5B$	$3.5B$	$H \geq 1.5B$ e $B \leq 2D$	$H \geq 3.5B$ e $2D \leq B \leq 3D$	TIPO TRINCEA
DE 110	100	10	2	1,79	0,63	0,22	0,33	0,95	2,21	NO	NO	LARGA
DE 125	114	11,4	2	1,775	0,65	0,25	0,38	0,98	2,29	NO	NO	LARGA
DE 140	127	12,7	2	1,76	0,68	0,28	0,42	1,02	2,37	NO	NO	LARGA
DE 160	145	14,6	2	1,74	0,71	0,32	0,48	1,07	2,49	NO	NO	LARGA
DE 180	164	16,4	2	1,72	0,74	0,36	0,54	1,11	2,60	NO	NO	LARGA
DE 200	182	18,2	2	1,7	0,77	0,40	0,60	1,16	2,71	NO	NO	LARGA
DE 225	205	20,5	2	1,675	0,81	0,45	0,68	1,22	2,84	NO	NO	LARGA
DE 280	255	25,4	2	1,62	0,90	0,56	0,84	1,35	3,15	NO	NO	LARGA
DE 355	323	32,2	2	1,545	1,02	0,71	1,07	1,53	3,56	NO	NO	LARGA
DE 400	364	36,3	2	1,5	1,09	0,80	1,20	1,63	3,81	NO	NO	LARGA
DE 450	409	40,9	2	1,45	1,17	0,90	1,35	1,75	4,09	NO	NO	LARGA

D_e	D_i	s	h_{smin}	H	B	$2D$	$3D$	$1.5B$	$3.5B$	$H \geq 1.5B$ e $B \leq 2D$	$H \geq 3.5B$ e $2D \leq B \leq 3D$	TIPO TRINCEA
DE 110	100	10	1,1	0,89	0,63	0,22	0,33	0,95	2,21	NO	NO	LARGA
DE 125	114	11,4	1,1	0,88	0,65	0,25	0,375	0,98	2,29	NO	NO	LARGA
DE 140	127	12,7	1,1	0,86	0,68	0,28	0,42	1,02	2,37	NO	NO	LARGA
DE 160	145	14,6	1,1	0,84	0,71	0,32	0,48	1,07	2,49	NO	NO	LARGA
DE 180	164	16,4	1,1	0,82	0,74	0,36	0,54	1,11	2,60	NO	NO	LARGA
DE 200	182	18,2	1,1	0,80	0,77	0,4	0,6	1,16	2,71	NO	NO	LARGA
DE 225	205	20,5	1,1	0,78	0,81	0,45	0,675	1,22	2,84	NO	NO	LARGA
DE 280	255	25,4	1,1	0,72	0,90	0,56	0,84	1,35	3,15	NO	NO	LARGA
DE 355	323	32,2	1,1	0,65	1,02	0,71	1,065	1,53	3,56	NO	NO	LARGA
DE 400	364	36,3	1,1	0,60	1,09	0,8	1,2	1,63	3,81	NO	NO	LARGA
DE 450	409	40,9	1,1	0,55	1,17	0,9	1,35	1,75	4,09	NO	NO	LARGA



Tubaz. PEAD	A	B	C	D
	Sp. mm	Rose	Sp. Sabbia	
Ø180	142	58	74	62
Ø200	144	60	72	62
Ø250	149	65	67	62
Ø315	156	72	61	62
Ø400	164	80	52	62
Ø450	169	85	47	62

mm	mm	mm	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	N/cm ²	N/cm ²	cm ⁴	N/cm ³	kg/m	kg/m ³	kg/m ⁴	kg/m ⁵	kg/m ⁶	cm ³		
D _e	D _i	s	h _{smax}	H	B	R	3D	H _s	E _t	E _s	v _s	J	K	EJ/KR ⁴	P _{tubo}	γ _{tub}	γ _t	γ _{so}	γ _s	W
DE 110	100	10	2	1,79	0,63	0,05	0,33	0,55	90000	690	0,40	0,0833	20	0,600	3,17	1921,99	1800	1000	2400	16,67
DE 125	114	11,4	2	1,775	0,65	0,06	0,38	0,55	90000	690	0,40	0,1235	20	0,534	4,11	1923,87	1800	1000	2400	21,66
DE 140	127	12,7	2	1,76	0,68	0,06	0,42	0,55	90000	690	0,40	0,1707	20	0,468	5,12	1920,34	1800	1000	2400	26,88
DE 160	145	14,6	2	1,74	0,71	0,07	0,48	0,55	90000	690	0,40	0,2593	20	0,418	6,73	1921,78	1800	1000	2400	35,53
DE 180	164	16,4	2	1,72	0,74	0,08	0,54	0,55	90000	690	0,40	0,3676	20	0,369	8,50	1920,58	1800	1000	2400	44,83
DE 200	182	18,2	2	1,7	0,77	0,09	0,60	0,55	90000	690	0,40	0,5024	20	0,331	10,48	1920,28	1800	1000	2400	55,21
DE 225	205	20,5	2	1,675	0,81	0,10	0,68	0,55	90000	690	0,40	0,7179	20	0,296	13,28	1920,40	1800	1000	2400	70,04
DE 280	255	25,4	2	1,62	0,90	0,13	0,84	0,55	90000	690	0,40	1,3656	20	0,234	10,48	982,67	1800	1000	2400	107,53
DE 355	323	32,2	2	1,545	1,02	0,16	1,07	0,55	90000	690	0,40	2,7822	20	0,184	32,92	1920,49	1800	1000	2400	172,81
DE 400	364	36,3	2	1,5	1,09	0,18	1,20	0,55	90000	690	0,40	3,9860	20	0,164	41,61	1911,08	1800	1000	2400	219,62
DE 450	409	40,9	2	1,45	1,17	0,20	1,35	0,55	90000	690	0,40	5,7015	20	0,147	52,99	1920,16	1800	1000	2400	278,80

mm	mm	mm	kg/m	m	m	°	m	kg/m ²	kg/m	kg	m	kg/m	kg/m	kg/m			
D _e	D _i	s	H _v /D	c	P _v	H _s	p	z	α	a	p _z	P _z	P	z	P _{vz}	P _{tubo}	P _{acqua}
DE 110	100	10	11,27	17		0,55	1320	1,52	40	1,66	147,44	16,2	1000	1,79	39,71	3,17	7,854
DE 125	114	11,4	9,80	16,8	472,5	0,55	1320	1,50	40	1,68	150,20	18,8	1000	1,78	45,70	4,11	10,136
DE 140	127	12,7	8,64	14,8	522,1	0,55	1320	1,49	40	1,69	153,00	21,4	1000	1,76	51,85	5,12	12,728
DE 160	145	14,6	7,44	12,7	585,2	0,55	1320	1,47	40	1,71	156,82	25,1	1000	1,74	60,30	6,73	16,604
DE 180	164	16,4	6,50	11	641,5	0,55	1320	1,45	40	1,73	160,72	28,9	1000	1,72	69,04	8,50	21,021
DE 200	182	18,2	5,75	9,4	676,8	0,55	1320	1,43	40	1,75	164,72	32,9	1000	1,70	78,08	10,48	25,958
DE 225	205	20,5	5,00	8,6	783,7	0,55	1320	1,40	40	1,78	169,86	38,2	1000	1,68	89,84	13,28	32,846
DE 280	255	25,4	3,82	6,8	959,6	0,55	1320	1,35	40	1,83	181,71	50,9	1000	1,62	117,62	10,48	50,91
DE 355	323	32,2	2,80	4,9	1111,5	0,55	1320	1,27	40	1,91	199,22	70,7	1000	1,55	160,26	32,92	81,838
DE 400	364	36,3	2,38	4	1152,0	0,55	1320	1,23	40	1,95	210,54	84,2	1000	1,50	188,87	41,61	103,89
DE 450	409	40,9	2,00	3,4	1239,3	0,55	1320	1,18	40	2,00	223,91	100,8	1000	1,45	223,71	52,99	131,45

mm mm mm				kg/m ² kg/m ² kg/m ² kg/m ² kg/m ²				
D _e	D _i	s	P _v	P' _v	P _o	P _p	P _w	
DE 110	100	10	595,6429289	595,64	7,51	19,22	50,00	
DE 125	114	11,4	5032,859764	5032,86	68,51	21,93	56,80	
DE 140	127	12,7	4982,657281	4982,66	85,33	24,39	63,65	
DE 160	145	14,6	4910,375263	4910,38	106,26	28,06	72,70	
DE 180	164	16,4	4813,116209	4813,12	130,37	31,50	81,80	
DE 200	182	18,2	4614,974787	4614,97	152,70	34,95	90,90	
DE 225	205	20,5	4747,388104	4747,39	194,18	39,37	102,25	
DE 280	255	25,4	4720,243678	4720,24	288,13	24,96	127,30	
DE 355	323	32,2	4430,604823	4430,60	418,60	61,84	161,40	
DE 400	364	36,3	4173,98449	4173,98	488,71	69,37	181,85	
DE 450	409	40,9	4071,278021	4071,28	585,57	78,53	204,55	

mm mm mm				kg m kg m kg m kg m kg m kg m kg m kg m kg m kg m kg m											
D _e	D _i	s	M _{1-A}	M _{2-A}	M _{3-A}	M _{4-A}	M _{1-CD}	M _{2-CD}	M _{3-CD}	M _{4-CD}	M _{1-B}	M _{2-B}	M _{3-B}	M _{4-B}	
DE 110	100	10	0,35	-0,004094191	0,020	0,03	-0,32	0,004469805	-0,023	-0,03025	0,35	-0,0041	0,0308	0,04	
DE 125	114	11,4	3,86	-0,048181601	0,030	0,04	-3,54	0,052601932	-0,034	-0,044346605	3,86	-0,0482	0,0453	0,05864	
DE 140	127	12,7	4,80	-0,075364031	0,041	0,05	-4,40	0,082278162	-0,048	-0,062403736	4,80	-0,0754	0,0632	0,08252	
DE 160	145	14,6	6,18	-0,122434218	0,062	0,08	-5,66	0,133666715	-0,072	-0,092986221	6,18	-0,1224	0,0949	0,12296	
DE 180	164	16,4	7,66	-0,190169515	0,089	0,11	-7,02	0,20761626	-0,102	-0,132457111	7,66	-0,1902	0,1349	0,17515	
DE 200	182	18,2	9,08	-0,275064845	0,121	0,16	-8,31	0,300300152	-0,14	-0,181763642	9,08	-0,2751	0,1848	0,24035	
DE 225	205	20,5	11,81	-0,44256913	0,173	0,22	-10,82	0,483171803	-0,2	-0,258705294	11,81	-0,4426	0,2634	0,34209	
DE 280	255	25,4	18,21	-1,017882526	0,170	0,43	-16,68	1,111266244	-0,196	-0,499229887	18,21	-1,0179	0,2589	0,66014	
DE 355	323	32,2	27,47	-2,377166002	0,677	0,88	-25,16	2,595254627	-0,781	-1,017480178	27,47	-2,3772	1,031	1,34543	
DE 400	364	36,3	32,85	-3,523171114	0,964	1,26	-30,09	3,846397822	-1,113	-1,455309225	32,85	-3,5232	1,4682	1,92438	
DE 450	409	40,9	40,54	-5,341142952	1,380	1,8	-37,14	5,831156067	-1,594	-2,071160799	40,54	-5,3411	2,103	2,73873	

				TUBO PIENO IN PRESSIONE									
D _e	D _i	s	MA	MCD	MB	σ	p _o	P _E (bar)	p _{o+} P _E (bar)	P _N			
DE 110	100	10	0,40	-0,37	0,42	25,3	0,46	3,79	4,25	16	VERIFICATA		
DE 125	114	11,4	3,88	-3,57	3,92	181	3,30	6,26	9,56	16	VERIFICATA		
DE 140	127	12,7	4,82	-4,43	4,87	181	3,29	6,93	10,22	16	VERIFICATA		
DE 160	145	14,6	6,20	-5,69	6,27	177	3,22	6,24	9,46	16	VERIFICATA		
DE 180	164	16,4	7,68	-7,05	7,78	174	3,16	5,50	8,66	16	VERIFICATA		
DE 200	182	18,2	9,08	-8,33	9,23	167	3,04	6,11	9,15	16	VERIFICATA		
DE 225	205	20,5	11,77	-10,80	11,98	171	3,12	0,00	3,12	16	VERIFICATA		
DE 280	255	25,4	17,79	-16,26	18,11	168	3,06	0,00	3,06	16	VERIFICATA		
DE 355	323	32,2	26,65	-24,36	27,47	159	2,88	0,00	2,88	16	VERIFICATA		
DE 400	364	36,3	31,55	-28,81	32,72	149	2,70	0,00	2,70	16	VERIFICATA		
DE 450	409	40,9	38,38	-34,97	40,04	144	2,61	0,00	2,61	16	VERIFICATA		

D _e	D _i	s	h _{min}	H	B	R	3D	H _s	E _t	E _s	v _s	J	K	EI/KR ⁴	P _{tubo}	γ _{tub}	γ _t	γ _∞	γ _s	W
DE 110	100	10	1,1	0,89	0,63	0,05	0,33	0,55	90000	690	0,40	0,0833	20,0	0,600	3,17	1921,99	1800	1000	2400	16,67
DE 125	114	11,4	1,1	0,875	0,65	0,06	0,38	0,55	90000	690	0,40	0,1235	20,0	0,534	4,11	1923,87	1800	1000	2400	21,66
DE 140	127	12,7	1,1	0,86	0,68	0,06	0,42	0,55	90000	690	0,40	0,1707	20,0	0,468	5,12	1920,34	1800	1000	2400	26,88
DE 160	145	14,6	1,1	0,84	0,71	0,07	0,48	0,55	90000	690	0,40	0,2593	20,0	0,418	6,73	1921,78	1800	1000	2400	35,53
DE 180	164	16,4	1,1	0,82	0,74	0,08	0,54	0,55	90000	690	0,40	0,3676	20,0	0,369	8,50	1920,58	1800	1000	2400	44,83
DE 200	182	18,2	1,1	0,8	0,77	0,09	0,60	0,55	90000	690	0,40	0,5024	20,0	0,331	10,48	1920,28	1800	1000	2400	55,21
DE 225	205	20,5	1,1	0,775	0,81	0,10	0,68	0,55	90000	690	0,40	0,7179	20,0	0,296	13,28	1920,40	1800	1000	2400	70,04
DE 280	255	25,4	1,1	0,72	0,90	0,13	0,84	0,55	90000	690	0,40	1,3656	20,0	0,234	10,48	982,67	1800	1000	2400	107,53
DE 355	323	32,2	1,1	0,645	1,02	0,16	1,07	0,55	90000	690	0,40	2,7822	20,0	0,184	32,92	1920,49	1800	1000	2400	172,81
DE 400	364	36,3	1,1	0,6	1,09	0,18	1,20	0,55	90000	690	0,40	3,9860	20,0	0,164	41,61	1911,08	1800	1000	2400	219,62
DE 450	409	40,9	1,1	0,55	1,17	0,20	1,35	0,55	90000	690	0,40	5,7015	20,0	0,147	52,99	1920,16	1800	1000	2400	278,80

D_e	D_i	s	H_v/D	c	P_v	H_s	p	z	α	a	p_z	P_z	P	z	P_{vz}	P_{tubo}	P_{acqua}
DE 110	100	10	3,09	5,40	117,61	0,55	1320,00	0,62	40,00	1,15	341,64	37,58	1000	0,89	114,80	3,17	7,85
DE 125	114	11,4	2,60	4,50	126,56	0,55	1320,00	0,60	40,00	1,16	352,11	44,01	1000	0,88	133,87	4,11	10,14
DE 140	127	12,7	2,21	3,50	123,48	0,55	1320,00	0,59	40,00	1,18	362,89	50,81	1000	0,86	153,93	5,12	12,73
DE 160	145	14,6	1,81	2,75	126,72	0,55	1320,00	0,57	40,00	1,20	377,80	60,45	1000	0,84	182,32	6,73	16,60
DE 180	164	16,4	1,50	2,00	116,64	0,55	1320,00	0,55	40,00	1,22	393,35	70,80	1000	0,82	212,76	8,50	21,02
DE 200	182	18,2	1,25	1,50	108,00	0,55	1320,00	0,53	40,00	1,24	409,57	81,91	1000	0,80	245,43	10,48	25,96
DE 225	205	20,5	1,00	1,30	118,46	0,55	1320,00	0,50	40,00	1,26	430,84	96,94	1000	0,78	289,76	13,28	32,85
DE 280	255	25,4	0,61	0,90	127,01	0,55	1320,00	0,45	40,00	1,32	481,97	134,95	1000	0,72	403,26	10,48	50,91
DE 355	323	32,2	0,27	0,50	113,42	0,55	1320,00	0,37	40,00	1,39	562,90	199,83	1000	0,65	604,29	32,92	81,84
DE 400	364	36,3	0,13	0,20	57,60	0,55	1320,00	0,33	40,00	1,44	618,92	247,57	1000	0,60	759,97	41,61	103,89
DE 450	409	40,9	0,00	0,10	36,45	0,55	1320,00	0,28	40,00	1,49	689,05	310,07	1000	0,55	975,81	52,99	131,45

D_e	D_i	s	p_v	p'_v	p_o	p_p	p_w
DE 110	100	10	2875,63	2875,63	31,53	19,22	50,00
DE 125	114	11,4	2853,44	2853,44	39,61	21,93	56,80
DE 140	127	12,7	2746,59	2746,59	48,15	24,39	63,65
DE 160	145	14,6	2705,51	2705,51	60,15	28,06	72,70
DE 180	164	16,4	2604,80	2604,80	72,85	31,50	81,80
DE 200	182	18,2	2550,21	2550,21	87,40	34,95	90,90
DE 225	205	20,5	2630,37	2630,37	111,76	39,37	102,25
DE 280	255	25,4	2783,41	2783,41	176,00	24,96	127,30
DE 355	323	32,2	3028,07	3028,07	296,52	61,84	161,40
DE 400	364	36,3	3119,72	3119,72	376,71	69,37	181,85
DE 450	409	40,9	3442,69	3442,69	504,70	78,53	204,55

D_e	D_i	s	$M_1 - A$	$M_2 - A$	$M_3 - A$	$M_4 - A$	$M_1 - CD$	$M_2 - CD$	$M_3 - CD$	$M_4 - CD$	$M_1 - B$	$M_2 - B$	$M_3 - B$	$M_4 - B$
DE 110	100	10	1,71	-0,017185296	0,020	0,03	-1,57	0,018761929	-0,023	-0,03025	1,71	-0,0172	0,0308	0,04
DE 125	114	11,4	2,19	-0,027856385	0,030	0,04	-2,01	0,030412017	-0,034	-0,044346605	2,19	-0,0279	0,0453	0,05864
DE 140	127	12,7	2,65	-0,04252724	0,041	0,05	-2,43	0,046428822	-0,048	-0,062403736	2,65	-0,0425	0,0632	0,08252
DE 160	145	14,6	3,40	-0,069307109	0,062	0,08	-3,12	0,075665559	-0,072	-0,092986221	3,40	-0,0693	0,0949	0,12296
DE 180	164	16,4	4,15	-0,106266856	0,089	0,11	-3,80	0,116016109	-0,102	-0,132457111	4,15	-0,1063	0,1349	0,17515
DE 200	182	18,2	5,02	-0,157439656	0,121	0,16	-4,59	0,171883662	-0,14	-0,181763642	5,02	-0,1574	0,1848	0,24035
DE 225	205	20,5	6,55	-0,254716671	0,173	0,22	-6,00	0,278085173	-0,2	-0,258705294	6,55	-0,2547	0,2634	0,34209
DE 280	255	25,4	10,74	-0,621776486	0,170	0,43	-9,83	0,6788202	-0,196	-0,499229887	10,74	-0,6218	0,2589	0,66014
DE 355	323	32,2	18,77	-1,683920021	0,677	0,88	-17,20	1,838408097	-0,781	-1,017480178	18,77	-1,6839	1,031	1,34543
DE 400	364	36,3	24,55	-2,715726534	0,964	1,26	-22,49	2,964875757	-1,113	-1,455309225	24,55	-2,7157	1,4682	1,92438
DE 450	409	40,9	34,28	-4,603493811	1,380	1,8	-31,40	5,025832693	-1,594	-2,071160799	34,28	-4,6035	2,103	2,73873

D_e	D_i	s	MA	MCD	MB	σ	p_o	P_E (bar)	$p_o + P_E$ (bar)	p_N	
DE 110	100	10	1,74	-1,60	1,76	106	1,92	3,79	5,71	16	VERIFICATA
DE 125	114	11,4	2,23	-2,06	2,27	105	1,91	6,26	8,17	16	VERIFICATA
DE 140	127	12,7	2,70	-2,49	2,75	102	1,86	6,93	8,79	16	VERIFICATA
DE 160	145	14,6	3,48	-3,21	3,55	100	1,82	6,24	8,06	16	VERIFICATA
DE 180	164	16,4	4,25	-3,92	4,35	97,1	1,77	5,50	7,27	16	VERIFICATA
DE 200	182	18,2	5,14	-4,74	5,28	95,7	1,74	6,11	7,85	16	VERIFICATA
DE 225	205	20,5	6,69	-6,18	6,90	98,5	1,79	0,00	1,79	16	VERIFICATA
DE 280	255	25,4	10,72	-9,85	11,03	103	1,86	0,00	1,86	16	VERIFICATA
DE 355	323	32,2	18,65	-17,16	19,47	113	2,04	0,00	2,04	16	VERIFICATA
DE 400	364	36,3	24,06	-22,09	25,23	115	2,09	0,00	2,09	16	VERIFICATA
DE 450	409	40,9	32,86	-30,04	34,52	124	2,25	0,00	2,25	16	VERIFICATA

4.1.2 Tubazioni in PEAD PN 25

D_e	D_i	s	h_{smax}	H	B	$2D$	$3D$	$1.5B$	$3.5B$	$H \geq 1.5B$ e $B \leq 2D$	$H \geq 3.5B$ e $2D \leq B \leq 3D$	TIPO TRINCEA	
DE	125	108	17,1	2	1,775	0,65	0,25	0,38	0,98	2,29	NO	NO	LARGA
DE	140	121	19,2	2	1,76	0,68	0,28	0,42	1,02	2,37	NO	NO	LARGA
DE	160	138	21,9	2	1,74	0,71	0,32	0,48	1,07	2,49	NO	NO	LARGA
DE	180	155	24,6	2	1,72	0,74	0,36	0,54	1,11	2,60	NO	NO	LARGA
DE	200	173	27,4	2	1,7	0,77	0,40	0,60	1,16	2,71	NO	NO	LARGA
DE	250	216	34,2	2	1,65	0,85	0,50	0,75	1,28	2,98	NO	NO	LARGA
DE	280	242	38,3	2	1,62	0,90	0,56	0,84	1,35	3,15	NO	NO	LARGA
DE	315	272	43,1	2	1,585	0,95	0,63	0,95	1,43	3,34	NO	NO	LARGA

D_e	D_i	s	h_{smin}	H	B	$2D$	$3D$	$1.5B$	$3.5B$	$H \geq 1.5B$ e $B \leq 2D$	$H \geq 3.5B$ e $2D \leq B \leq 3D$	TIPO TRINCEA	
DE	125	108	17,1	1,1	0,88	0,65	0,25	0,375	0,98	2,29	NO	NO	LARGA
DE	140	121	19,2	1,1	0,86	0,68	0,28	0,42	1,02	2,37	NO	NO	LARGA
DE	160	138	21,9	1,1	0,84	0,71	0,32	0,48	1,07	2,49	NO	NO	LARGA
DE	180	155	24,6	1,1	0,82	0,74	0,36	0,54	1,11	2,60	NO	NO	LARGA
DE	200	173	27,4	1,1	0,80	0,77	0,4	0,6	1,16	2,71	NO	NO	LARGA
DE	250	216	34,2	1,1	0,75	0,85	0,5	0,75	1,28	2,98	NO	NO	LARGA
DE	280	242	38,3	1,1	0,72	0,90	0,56	0,84	1,35	3,15	NO	NO	LARGA
DE	315	272	43,1	1,1	0,69	0,95	0,63	0,945	1,43	3,34	NO	NO	LARGA

mm	mm	mm	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	N/cm^2	N/cm^2	cm^4	N/cm^3	kg/m	kg/m ³	kg/m ⁴	kg/m ⁵	kg/m ⁶	cm ³	
D_e	D_i	s	h_{smax}	H	B	R	$3D$	H_s	E_t	E_s	v_s	J	K	EI/KR^4	P_{tubo}	γ_{tub}	γ_t	γ_ω	γ_s	W	
DE	125	108	17,1	2	1,775	0,65	0,05	0,38	0,55	90000	690	0,40	0,4167	20	2,213	5,85	1870,25	1800	1000	2400	48,74
DE	140	121	19,2	2	1,76	0,68	0,06	0,42	0,55	90000	690	0,40	0,5898	20	1,994	7,35	1868,91	1800	1000	2400	61,44
DE	160	138	21,9	2	1,74	0,71	0,07	0,48	0,55	90000	690	0,40	0,8753	20	1,733	9,58	1868,40	1800	1000	2400	79,94
DE	180	155	24,6	2	1,72	0,74	0,08	0,54	0,55	90000	690	0,40	1,2406	20	1,532	12,11	1868,77	1800	1000	2400	100,86
DE	200	173	27,4	2	1,7	0,77	0,09	0,60	0,55	90000	690	0,40	1,7142	20	1,391	14,98	1868,22	1800	1000	2400	125,13
DE	250	216	34,2	2	1,65	0,85	0,11	0,75	0,55	90000	690	0,40	3,3335	20	1,107	23,38	1868,65	1800	1000	2400	194,94
DE	280	242	38,3	2	1,62	0,90	0,12	0,84	0,55	90000	690	0,40	4,6818	20	0,988	29,32	1868,33	1800	1000	2400	244,48
DE	315	272	43,1	2	1,585	0,95	0,14	0,95	0,55	90000	690	0,40	6,6719	20	0,879	46,38	2334,53	1800	1000	2400	309,60

mm	mm	mm	kg/m	m	m	°	m	kg/m ²	kg/m	kg	m	kg/m	kg/m	kg/m				
D_e	D_i	s	H_v/D	c	P_v	H_s	p	z	α	a	p_z	P_z	P	z	P_{vz}	P_{tubo}	P_{acqua}	
DE	125	108	17,1	9,80	16,6		0,55	1320	1,50	40	1,68	150,20	18,8	1000	1,78	45,70	5,85	9,1439
DE	140	121	19,2	8,64	14,7	518,6	0,55	1320	1,49	40	1,69	153,00	21,4	1000	1,76	51,85	7,35	11,461
DE	160	138	21,9	7,44	12,7	585,2	0,55	1320	1,47	40	1,71	156,82	25,1	1000	1,74	60,30	9,58	14,979
DE	180	155	24,6	6,50	11,2	653,2	0,55	1320	1,45	40	1,73	160,72	28,9	1000	1,72	69,04	12,11	18,967
DE	200	173	27,4	5,75	9,9	712,8	0,55	1320	1,43	40	1,75	164,72	32,9	1000	1,70	78,08	14,98	23,398
DE	250	216	34,2	4,40	7,6	855,0	0,55	1320	1,38	40	1,80	175,15	43,8	1000	1,65	102,13	23,38	36,576
DE	280	242	38,3	3,82	6,6	931,4	0,55	1320	1,35	40	1,83	181,71	50,9	1000	1,62	117,62	29,32	45,882
DE	315	272	43,1	3,29	5,8	1035,9	0,55	1320	1,31	40	1,87	189,68	59,7	1000	1,59	136,79	46,38	58,064

mm	mm	mm	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	kg/m ²	
D_e	D_i	s	p_v	p'_v	p_o	p_p	p_w	
DE	125	108	17,1	604,314296	604,31	2,65	31,98	53,95
DE	140	121	19,2	4953,133645	4953,13	22,51	35,88	60,40
DE	160	138	21,9	4910,375263	4910,38	29,31	40,92	69,05
DE	180	155	24,6	4889,034131	4889,03	37,09	45,97	77,70
DE	200	173	27,4	4825,857905	4825,86	44,80	51,19	86,30
DE	250	216	34,2	4690,588291	4690,59	68,29	63,91	107,90
DE	280	242	38,3	4602,149132	4602,15	84,06	71,56	120,85
DE	315	272	43,1	4583,804453	4583,80	106,46	100,62	135,95

mm mm mm			kg m				kg m				kg m			
D_e	D_i	s	$M_1 - A$	$M_2 - A$	$M_3 - A$	$M_4 - A$	$M_1 - CD$	$M_2 - CD$	$M_3 - CD$	$M_4 - CD$	$M_1 - B$	$M_2 - B$	$M_3 - B$	$M_4 - B$
DE 125	108	17,1	0,42	-0,001680907	0,039	0,032975671	-0,38	0,001835119	-0,045	-0,038000535	0,42	-0,0017	0,0596	0,05025
DE 140	121	19,2	4,30	-0,017898729	0,055	0,046273261	-3,94	0,019540814	-0,063	-0,053324425	4,30	-0,0179	0,0838	0,07051
DE 160	138	21,9	5,57	-0,030467366	0,082	0,06913697	-5,10	0,033262537	-0,095	-0,079672128	5,57	-0,0305	0,1249	0,10535
DE 180	155	24,6	7,02	-0,04881894	0,117	0,098510461	-6,43	0,053297742	-0,135	-0,113521579	7,02	-0,0488	0,1776	0,15011
DE 200	173	27,4	8,55	-0,072732929	0,160	0,134974486	-7,84	0,079405675	-0,185	-0,155542027	8,55	-0,0727	0,244	0,20568
DE 250	216	34,2	13,00	-0,173328144	0,312	0,263805368	-11,90	0,189229809	-0,361	-0,304004281	13,00	-0,1733	0,4762	0,40199
DE 280	242	38,3	16,00	-0,267623117	0,439	0,37064595	-14,65	0,292175696	-0,507	-0,427125333	16,00	-0,2676	0,6688	0,56479
DE 315	272	43,1	20,16	-0,42895361	0,781	0,52766335	-18,47	0,468307152	-0,902	-0,608069194	20,16	-0,4290	1,1902	0,80406

			TUBO PIENO IN PRESSIONE								
D_e	D_i	s	MA	MCD	MB	σ	P_0	P_E (bar)	P_{0+P_E} (bar)	P_N	
DE 125	108	17,1	0,49	-0,46	0,53	10,80875639	0,30	3,79	4,08	25	VERIFICATA
DE 140	121	19,2	4,38	-4,04	4,44	72,21698695	1,98	6,26	8,24	25	VERIFICATA
DE 160	138	21,9	5,69	-5,24	5,77	72,20672887	1,98	6,93	8,90	25	VERIFICATA
DE 180	155	24,6	7,19	-6,63	7,30	72,41574445	1,98	6,24	8,22	25	VERIFICATA
DE 200	173	27,4	8,78	-8,10	8,93	71,37577504	1,96	5,50	7,46	25	VERIFICATA
DE 250	216	34,2	13,40	-12,38	13,70	70,28813729	1,92	6,11	8,04	25	VERIFICATA
DE 280	242	38,3	16,54	-15,29	16,96	69,38245295	1,90	0,00	1,90	25	VERIFICATA
DE 315	272	43,1	21,04	-19,51	21,73	70,18238957	1,92	0,00	1,92	25	VERIFICATA

D_e	D_i	s	h_{smin}	H	B	R	$3D$	H_s	E_t	E_s	v_s	J	K	EI/KR^4	P_{tubo}	γ_{tubo}	γ_t	γ_{∞}	γ_s	W
DE 125	108	17,1	1,1	0,875	0,65	0,05	0,38	0,55	90000	690	0,40	0,4167	20,0	2,213	5,85	1870,25	1800	1000	2400	48,74
DE 140	121	19,2	1,1	0,86	0,68	0,06	0,42	0,55	90000	690	0,40	0,5898	20,0	1,994	7,35	1868,91	1800	1000	2400	61,44
DE 160	138	21,9	1,1	0,84	0,71	0,07	0,48	0,55	90000	690	0,40	0,8753	20,0	1,733	9,58	1868,40	1800	1000	2400	79,94
DE 180	155	24,6	1,1	0,82	0,74	0,08	0,54	0,55	90000	690	0,40	1,2406	20,0	1,532	12,11	1868,77	1800	1000	2400	100,86
DE 200	173	27,4	1,1	0,8	0,77	0,09	0,60	0,55	90000	690	0,40	1,7142	20,0	1,391	14,98	1868,22	1800	1000	2400	125,13
DE 250	216	34,2	1,1	0,75	0,85	0,11	0,75	0,55	90000	690	0,40	3,3335	20,0	1,107	23,38	1868,65	1800	1000	2400	194,94
DE 280	242	38,3	1,1	0,72	0,90	0,12	0,84	0,55	90000	690	0,40	4,6818	20,0	0,988	29,32	1868,33	1800	1000	2400	244,48
DE 315	272	43,1	1,1	0,685	0,95	0,14	0,95	0,55	90000	690	0,40	6,6719	20,0	0,879	46,38	2334,53	1800	1000	2400	309,60

D_e	D_i	s	H_1/D	c	P_v	H_s	p	z	α	a	p_z	P_z	P	z	P_{vz}	P_{tubo}	P_{acqua}
DE 125	108	17,1	2,60	4,80	135,00	0,55	1320,00	0,60	40,00	1,16	352,11	44,01	1000	0,88	133,87	5,85	9,14
DE 140	121	19,2	2,21	3,30	116,42	0,55	1320,00	0,59	40,00	1,18	362,89	50,81	1000	0,86	153,93	7,35	11,46
DE 160	138	21,9	1,81	2,70	124,42	0,55	1320,00	0,57	40,00	1,20	377,80	60,45	1000	0,84	182,32	9,58	14,98
DE 180	155	24,6	1,50	2,00	116,64	0,55	1320,00	0,55	40,00	1,22	393,35	70,80	1000	0,82	212,76	12,11	18,97
DE 200	173	27,4	1,25	1,60	115,20	0,55	1320,00	0,53	40,00	1,24	409,57	81,91	1000	0,80	245,43	14,98	23,40
DE 250	216	34,2	0,80	1,00	112,50	0,55	1320,00	0,48	40,00	1,29	453,31	113,33	1000	0,75	338,40	23,38	36,58
DE 280	242	38,3	0,61	0,80	112,90	0,55	1320,00	0,45	40,00	1,32	481,97	134,95	1000	0,72	403,26	29,32	45,88
DE 315	272	43,1	0,43	0,50	89,30	0,55	1320,00	0,41	40,00	1,35	517,98	163,16	1000	0,69	489,35	46,38	58,06

D_e	D_i	s	p_v	p'_v	P_0	P_p	P_w
DE 125	108	17,1	2932,53	2932,53	10,93	31,98	53,95
DE 140	121	19,2	2687,55	2687,55	12,53	35,88	60,40
DE 160	138	21,9	2688,64	2688,64	16,52	40,92	69,05
DE 180	155	24,6	2604,80	2604,80	20,45	45,97	77,70
DE 200	173	27,4	2592,39	2592,39	24,99	51,19	86,30
DE 250	216	34,2	2644,14	2644,14	40,18	63,91	107,90
DE 280	242	38,3	2724,37	2724,37	51,95	71,56	120,85
DE 315	272	43,1	2759,03	2759,03	67,39	100,62	135,95

D_e	D_i	s	$M_1 - A$	$M_2 - A$	$M_3 - A$	$M_4 - A$	$M_1 - CD$	$M_2 - CD$	$M_3 - CD$	$M_4 - CD$	$M_1 - B$	$M_2 - B$	$M_3 - B$	$M_4 - B$
DE 125	108	17,1	2,03	-0,006935022	0,039	0,032975671	-1,86	0,007571263	-0,045	-0,038000535	2,03	-0,0069	0,0596	0,05025
DE 140	121	19,2	2,33	-0,00996394	0,055	0,046273261	-2,14	0,010878063	-0,063	-0,053324425	2,33	-0,0100	0,0838	0,07051
DE 160	138	21,9	3,05	-0,017169163	0,082	0,06913697	-2,79	0,018744316	-0,095	-0,079672128	3,05	-0,0172	0,1249	0,10535
DE 180	155	24,6	3,74	-0,026916109	0,117	0,098510461	-3,43	0,029385477	-0,135	-0,113521579	3,74	-0,0269	0,1776	0,15011
DE 200	173	27,4	4,60	-0,040569468	0,160	0,134974486	-4,21	0,044291437	-0,185	-0,155542027	4,60	-0,0406	0,244	0,20568
DE 250	216	34,2	7,33	-0,101980901	0,312	0,263805368	-6,71	0,111336947	-0,361	-0,304004281	7,33	-0,1020	0,4762	0,40199
DE 280	242	38,3	9,47	-0,165414993	0,439	0,37064595	-8,67	0,18059068	-0,507	-0,427125333	9,47	-0,1654	0,6688	0,56479
DE 315	272	43,1	12,14	-0,271531769	0,781	0,52766335	-11,12	0,296442941	-0,902	-0,608069194	12,14	-0,2715	1,1902	0,80406

	D_e	D_i	s	MA	MCD	MB	σ	p_0	P_E (bar)	p_{0+P_E} (bar)	p_N	
DE	125	108	17,1	2,10	-1,94	2,13	43,79433433	1,20	3,79	4,98	25	VERIFICATA
DE	140	121	19,2	2,42	-2,24	2,48	40,32913844	1,11	6,26	7,37	25	VERIFICATA
DE	160	138	21,9	3,18	-2,95	3,26	40,83317956	1,12	6,93	8,05	25	VERIFICATA
DE	180	155	24,6	3,93	-3,65	4,04	40,091149	1,10	6,24	7,34	25	VERIFICATA
DE	200	173	27,4	4,85	-4,51	5,00	39,993348	1,10	5,50	6,60	25	VERIFICATA
DE	250	216	34,2	7,80	-7,26	8,10	41,5657538	1,14	6,11	7,25	25	VERIFICATA
DE	280	242	38,3	10,11	-9,43	10,54	43,1031061	1,18	0,00	1,18	25	VERIFICATA
DE	315	272	43,1	13,17	-12,33	13,86	44,76454524	1,22	0,00	1,22	25	VERIFICATA

4.2 TUBAZIONI IN ACCIAIO

In relazione ai carichi esterni, a vantaggio di sicurezza la tubazione è stata verificata rispetto alle condizioni di posa potenzialmente più sfavorevoli: in particolare verificando, coerentemente con le reali profondità di scavo evincibili dai profili longitudinali del progetto, la condizione di posa con massimo rinterro e quella con minimo rinterro (h_{smax} e h_{smin}), rappresentative rispettivamente della condizione che massimizza i carichi permanenti dovuti al terreno di ricoprimento e di quella che massimizza i sovraccarichi esterni dovuti al traffico veicolare. Mentre la stima della p_E è stata effettuata considerando la condizione più gravosa di funzionamento idraulico lungo tutto lo schema idraulico.

Le caratteristiche della tubazione sono invece riportate nella tabella seguente.

	<i>Caratteristiche meccaniche tubazione in acciaio</i>		
<i>Tipologia acciaio</i>	<i>Carico unitario di rottura R_r (N/mm²)</i>	<i>Carico unitario di snervamento R_s (N/mm²)</i>	<i>Allungamento percentuale A (min)%</i>
S275	430-570	2,75	L24/T19

h_{scavo}	2	m	Altezza scavo trincea
D_e	508	mm	Diametro esterno
s	6,3	mm	Spessore condotta
E_t	21000000	N/cm ²	Modulo elastico condotta
E_s	690	N/cm ²	Modulo elastico terreno (vedi tabella 1)
r	247,7	mm	Raggio interno
V_s	0,3		Coefficiente di Poisson
B	1,4	m	Larghezza trincea generatrice sup.
H	1,3	m	Altezza del rinterro sopra la generatrice sup. del tubo
γ_t	1,8	kN/mc.	Peso specifico terreno
γ_s	2,4	kN/mc.	Peso specifico sovraccarico (massetto in cls/ misto cementato)
H_s	0,55	m	Altezza sovraccarico fisso
α	40	°	angolo di scarico sovraccarichi verticali
h			angolo di appoggio tubazione per un angolo di 90°
γ_{tub}	7800	Kg/mc.	Peso specifico tubazione
γ_w	1000	Kg/mc.	Peso specifico acqua
K	20	N/cm ³	Coefficiente di rigidità
$\sigma_{SNERVAMENTO}$ ACCIAIO L275 = R_s	275	N/mm ²	Resistenza allo snervamento della tubazione in acciaio
J	0,0208	cm ⁴	Momento di inerzia della parete del tubo per unità di lunghezza pari a 1cm
R	250,85	mm	Raggio medio tubazione

Verifica di flessibilità della condotta

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

 Se $n \geq 1$

TUBAZIONE FLESSIBILE

 Se $n < 1$

TUBAZIONE RIGIDA

n

2,00

TUBAZIONE FLESSIBILE
Verifica del tipo di posa della condotta- Trincea stretta/larga

H	1,3 m	
2D	1,016 m	
3D	1,524 m	
B	1,4 m	
$H \geq 1,5B$	$B \leq 2D$	TRINCEA LARGA
NON VERIFICATA	NON VERIFICATA	
$H \geq 3,5B$	$2D < B < 3D$	
NON VERIFICATA	NON VERIFICATA	

TUBAZIONE FLESSIBILE POSATA IN TRINCEA LARGA

Azioni terreno di ricoprimento	$P_v = C_e \gamma_t D^2$	
C_e	4	vedi Tabella 2
γ_t	1800 kg/mc.	
D^2	0,2581 m ²	
P_v	1858,06 kg/m	Scarico a metro lineare

Azioni sovraccarichi fissi verticali	$p_z = p \left(\frac{ab}{(a + 2z \operatorname{tg} \alpha)(b + 2z \operatorname{tg} \alpha)} \right)$	
γ_t	2400 kg/mc.	Peso specifico sovraccarico verticale fisso
p	1320 kg/m ²	Scarico a metro quadrato del sovraccarico verticale fisso
z	1,025 m	Distanza verticale tra il punto di applicazione del carico fisso e la generatrice superiore del tubo
α	40 gradi	angolo di scarico
a	2,15	Dimensione trasversale in pianta del sovraccarico
b	1	Dimensione longitudinale
p_z	269,84 kg/m ²	Scarico a profondità z
A_t	0,508 m ²	Area tubazione definita dalla proiezione ortogonale del suo contorno di lunghezza 1 m
P_z	137,08 kg/m	Scarico a metro lineare di tubazione

Azioni sovraccarichi mobili in superficie	$p_z = 0,5281 \frac{P}{z^{1,0461}}$ per convogli pesanti HT	
P	1000 kg	Sovraccarico ruota
z	1,3 m	Distanza verticale tra il punto di applicazione del carico mobile e la generatrice superiore del tubo
P_{vz}	298,13 kg/m	Scarico verticale a metro lineare di tubazione

Peso tubazione	$P_p = \gamma_m \pi (D_e - s)s$ $P_W = \gamma_{tub} s$	
γ_t	7800 kg/mc.	Peso specifico tubazione
P_{tub}	77,45 kg/m	Scarico a metro lineare di tubazione
P_p	49,14 kg/m²	Scarico a metro quadrato di parete del tubo

Carico acqua		$P_w = \frac{1}{2} \gamma_w D = \gamma_w r$	
γ_w	1000 kg/mc.	<i>Peso specifico tubazione</i>	
P_{acqua}	192,75 kg/m	Scarico a metro lineare di tubazione	
P_w	247,70 kg/m²	Scarico a metro quadrato di parete del tubo	

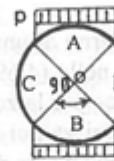
Distribuzione delle azioni verticali e orizzontali - DESADELEER			
P_v [Kg/m ²]	5288,84	$p_v = \frac{P_v + P_z + P_{vz}}{\frac{1}{2} \left(\frac{D}{\sqrt{2}} + D \right)}$	
P'_v [Kg/m ²]	5288,84	$p'_v = \frac{P_v + P_z + P_{vz}}{\frac{1}{2} \left(\frac{D}{\sqrt{2}} + D \right)}$	
P_o [Kg/m ²]	3235,91	$p_o = \frac{P_v + P_z + P_{vz} + P_{tub} + P_{acqua}}{1,07 + 13,07 \frac{EI}{KR^4}}$	

Distribuzione delle azioni verticali e orizzontali			
P_v [Kg/m ²]	5288,84		
P'_v [Kg/m ²]	5288,84		
P_o [Kg/m ²]	3235,91		
R	[m]	0,25085	

P_p [Kg/m ²]	49,14
P_w [Kg/m ²]	247,70

M1 - Momenti indotti dal azioni verticali e dalle reazioni verticali del terreno

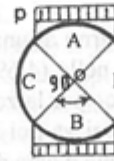
M_A	79,20731 Kg m
M_{CD}	-72,5512 Kg m
M_B	79,20731 Kg m



$$\begin{aligned}
 M_A &= 0,238 p r^2 \\
 M_{CD} &= -0,218 p r^2 \\
 M_B &= 0,238 p r^2
 \end{aligned}$$

M2 - Momenti indotti dalle pressioni orizzontali

M_A	-44,390 Kg m
M_{CD}	48,462 Kg m
M_B	-44,390 Kg m



$$\begin{aligned}
 M_A &= 0,238 p r^2 \\
 M_{CD} &= -0,218 p r^2 \\
 M_B &= 0,238 p r^2
 \end{aligned}$$

Momento indotto dal peso dell'acqua

M_A	3,273 Kg m
M_{BC}	-3,772 Kg m
M_B	4,988 Kg m



$$\begin{aligned}
 M_A &= 0,21 \gamma_a r^3 \\
 M_{CD} &= -0,242 \gamma_a r^3 \\
 M_B &= 0,32 \gamma_a r^3
 \end{aligned}$$

Risultati verifica alle tensioni ammissibili

Tubo pieno con rinterro	
M_A	39389,65 N cm
M_{CD}	-29360,90 N cm
M_B	41784,47 N cm
W	6,615 cm ³
σ	5954,60 N/cm ²
σ	-4438,53 N/cm ²
σ	6316,62 N/cm ²

Tubo pieno con rinterro sottoposto alla pressione di esercizio P_E (comprensiva di sovrappressione per colpo d'ariete)	
M_A	39389,65 N cm
M_{CD}	-29360,90 N cm
M_B	41784,47 N cm
W	6,615 cm ³
σ	5954,60 N/cm ²
σ	-4438,53 N/cm ²
σ	6316,62 N/cm ²

p_o	15,67 bar	VERIFICATA
$p_{ammissibile}$	34,104 bar	

p_o	15,67 bar	VERIFICATA
p_E	9,2 bar	
$p_{ammissibile}$	34,104 bar	

σ_{t-max}	63,17 N/mm ²	VERIFICATA
σ_{AMMmax}	275 N/mm ²	

σ_{t-max}	100,26 N/mm ²	VERIFICATA
σ_{AMMmax}	275 N/mm ²	

Risultati verifica all'ovalizzazione

f_R	1,6		fattore di ritardo dell'inflexione che tiene conto dell'assestamento del terreno nel tempo
R	25,085	cm	Raggio medio della tubazione
J	0,0208	cm ⁴	Momento di inerzia della parete del tubo per unità di lunghezza pari a 1cm
K_s	0,096		Coefficiente di appoggio
Δx_2	0,5058154	cm	Massima deformazione orizzontale
% Δ	0,996%		

Risultati verifica depressione interna

$$\frac{\Delta_p D_E}{2s} + \frac{P_v + P_s}{2s} \leq \frac{\sigma_{cr}}{v_s}$$

Δ_p	0,0785	N/mm ²
p_{cr}	0,880	N/mm ²
σ_{cr}	35,49	N/mm ²
$\frac{\Delta_p D_E}{2s}$	3,16	N/mm ²
$\frac{P_v + P_s}{2s}$	1,820	N/mm ²
v_s	7,12	