



BY-PASS NUOVO ACQUEDOTTO DI SCILLATO TRA LE PROGRESSIVE 12.410 E 15.425 m (C.DE BURGITABUS E SCACCIAPIDOCCHI)

- Progetto esecutivo -

CUP: D63H08000060004

<i>Classe</i>	1					RELAZIONI					
<i>Tavola</i>	1.4					RELAZIONE VERIFICHE STATICHE DELLE TUBAZIONI					
<i>Scala</i>	-										
<i>Data</i>		2	ADEGUAMENTO ALLE PROCEDURE DI VERIFICA DEL 18/09/2017 TAB. 5			AL	GDT	CA			
SETTEMBRE 2017		1	AGGIORNAMENTO PREZZI 2013 E ADEGUAMENTO AL D.LGS 50/2016 - DICEMBRE 2016			AL	GDT	CA			
Settore: ADDUZIONE		0	PRIMA EMISSIONE - LUGLIO 2010			GA	CA	GDT			
Nuovo Scillato_1.4-rev2.doc	<i>Rev.</i>		<i>Descrizione</i>			<i>Redatto</i>	<i>Verificato</i>	<i>Approvato</i>			
<i>Progettazione</i> Società di Ingegneria STUDIO APPLICAZIONI IDRAULICHE S.A.I. s.r.l. S.A.I. s.r.l. GIOVANNI DI TRAPANI n° 1937 Ordine Ingegneri Palermo 		 <i>Il Responsabile del Procedimento F.P.</i> <hr/> Ing. Maurizio BISSO		AMAP S.p.A. <i>Il Dirigente del Servizio Tecnico</i> <hr/> Ing. Giovanni PULERI		<i>Consulenza Geologica</i> Dott. Geol. Ugo PIACENTINI <i>Consulenza Geotecnica</i> Ing. Giovanni BARONE <i>Coordinatore della sicurezza in fase di progettazione</i> Ing. Cesare ARICI					
Redazione: Società di Ingegneria STUDIO APPLICAZIONI IDRAULICHE S.A.I. s.r.l. - Via Alfonso Borrelli, 50 - 90139 PALERMO - tel. 091.586758 - fax. 091.586442 - studiosai01@gmail.com Questo documento è di proprietà del Progettista (L. 22.04.1941 n° 633 - art. 2575 e segg. C.C.) - Non può essere modificato, copiato, duplicato, riprodotto o divulgato senza autorizzazione scritta dello stesso											

1. PREMESSA

La presente relazione riguarda il complesso delle verifiche statiche delle tubazioni in progetto.

Nello specifico si procederà, nel seguito, alla valutazione della condotta in acciaio DN 900 e del tubo camicia (DN 1100) da utilizzare lungo gli attraversamenti con spingitubo del rilevato autostradale.

2. VERIFICA DN 900

Lo spessore adottato per la tubazione in progetto DN 900 è stato calcolato in prima approssimazione verificando la stabilità dell'equilibrio nei confronti delle depressioni che possono insorgere al suo interno. Tale spessore, è stato fissato sulla base della norma UNI EN 10224, opportunamente ridotto per tenere conto della tolleranza massima ammissibile per l'accettazione del tubo; lo spessore così ridotto cautelativamente è stato utilizzato per le verifiche di resistenza del materiale nei confronti dello stato di tensione indotto dai carichi agenti.

2.1 CALCOLO DELLO SPESSORE MINIMO

Lo spessore minimo da assegnare alla tubazione è stato calcolato con la formula di Allievi:

$$s_{min} = D \left(\frac{\alpha \| p_{cr} \|}{2 E_s} \right)^{\frac{1}{3}}$$

dove:

s_{min} = spessore minimo richiesto;

D = diametro interno della tubazione;

p_{cr} = depressione massima teorica in condotta (- 1,033 kg/cm²);

α = coefficiente di amplificazione della depressione;

E_s = modulo elastico dell'acciaio.

Ponendo, cautelativamente, $\alpha = 2$, ed assumendo per l'acciaio $E_s = 2100000 \text{ kg/cm}^2$, si è ottenuto lo spessore minimo riportato in tabella 1.

	DN 900
s _{min} [mm]	7,2

Tab.1 - Spessore minimo da assegnare alla condotta

In relazione agli spessori delle tubazioni previsti dalla norma UNI EN 10224 per la condotta in esame è stato adottato il seguente valore (DN 900) s = 10,00 mm. Ai fini delle verifiche di resistenza, sulla base del limite di tolleranza per gli spessori del 7,5 %, fissato dalla suddetta norma, è stato utilizzato il seguente spessore: (DN 900) s = 9,25 mm.

2.2 VERIFICHE DI RESISTENZA

Le verifiche di resistenza del materiale costituente la condotta sono state effettuate in corrispondenza dei punti $A_i, A_e, B_i, B_e, C_i, C_e, D_i$ e D_e (Fig.1). In particolare, in ciascuno di detti punti è stata verificata la seguente disuguaglianza

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_c^2 - \sigma_l \sigma_c + 3\tau_{lc}^2} \leq \frac{f_{yk}}{\psi}$$

dove:

σ_{eq} = tensione equivalente;

σ_l = tensione longitudinale (avente direzione dell'asse del tubo)

σ_c = tensione circonferenziale (avente direzione tangenziale alla circonferenza);

τ_{lc} = tensione tangenziale;

f_{yk} = 355 N/mm² tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio costituente le condotte;

ψ = coefficiente di sicurezza, dipendente dalla combinazione di carico esaminata.

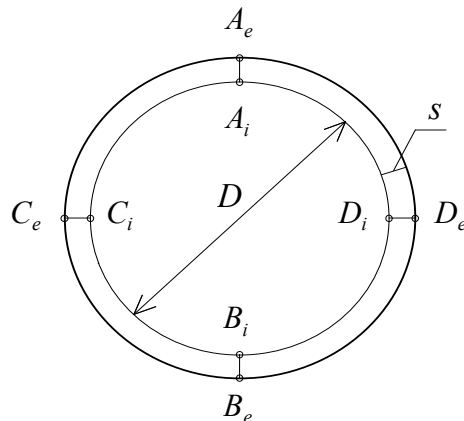


Fig.1 - Sezione trasversale della condotta e ubicazione dei punti di verifica

2.3 ANALISI DEI CARICHI

I carichi agenti sulla tubazione sono stati suddivisi in due gruppi, a seconda se essi agiscono durante il normale esercizio della condotta (*carichi di carattere normale*), o si verificano in condizioni eccezionali (*carichi di carattere saltuario e/o eccezionale*)

Nel caso specifico la tubazione sarà soggetta, oltre ai carichi di cui sopra, anche a quelli dovuti a mezzi agricoli (trattore). Nell'ambito delle verifiche che seguono il carico mobile verrà trasformato nello spessore di terreno che genera un carico equivalente sulla generatrice superiore della tubazione.

Per il calcolo del sovraccarico mobile, si considera un trattore di 12 tonnellate, con un'impronta in superficie di 1,30 x 1,65 m; con un carico totale (Q) pari a:

$$Q = 12000 \text{ kg.}$$

Ipotizzando la ripartizione del carico alla Winkler (45°) si calcola la superficie di ripartizione alla profondità di 2,50 m (altezza effettiva di ricoprimento rispetto alla generatrice superiore della tubazione) così come di seguito:

$$a = 1,30 + 2 * 2,50 = 6,30 \text{ m}$$

$$b = 1,65 + 2 * 2,50 = 6,65 \text{ m}$$

$$A = 6,30 * 6,65 = 41,89 \text{ m}^2$$

Quindi a partire dal carico totale (Q) sarà possibile determinare il carico distribuito a m² (q) che agisce sulla tubazione

$$q = Q/A = 12000/41,89 = 286,46 \text{ kg/m}^2$$

In definitiva l'altezza di ricoprimento equivalenti (H₂) sarà:

$$H_2 = q/\gamma_t = 286,46/1900 = 0,15 \text{ m}$$

Le verifiche di resistenza sono condotte con un'altezza di ricoprimento sulla generatrice superiore della tubazione data dalla somma dell'altezza effettiva e dell'altezza equivalente (H_1):

$$H_1 = H + H_2 = 2,50 + 0,15 = 2,65 \text{ m} .$$

2.3.1 Carichi di carattere normale

- (1) Pressione interna;
- (2) Peso proprio della tubazione;
- (3) Peso dell'acqua contenuta nella tubazione;
- (4) Sovraccarico dovuto al terreno di ricoprimento;
- (5) Sollecitazioni dovute agli effetti termici;
- (6) Spinte idrauliche in corrispondenza di deviazioni angolari.

2.3.2 Carichi di carattere saltuario e/o eccezionale

- (7) Azioni sismiche;
- (8) Depressioni all'interno della tubazione dovute al mancato funzionamento degli sfiati;
- (9) Sollecitazioni determinate da ovalizzazione della condotta;
- (10) Sovrappressioni conseguenti a prove idrauliche in opera.

2.4 CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI

Nel seguito si farà riferimento alla seguente simbologia:

a) Sollecitazioni per unità di lunghezza sulle pareti della condotta:

$M^{(A)}, M^{(B)}, M^{(C)}, M^{(D)}$ = momenti flettenti in corrispondenza delle sezioni $A, B, C,$ e D , positivi se tendono le fibre interne della tubazione;

$N^{(A)}, N^{(B)}, N^{(C)}, N^{(D)}$ = sforzi normali in corrispondenza delle sezioni $A, B, C,$ e D , positivi se sono di trazione;

b) Sollecitazioni sulle sezioni trasversali della condotta:

$M^{(AB)}$ = momento flettente contenuto nel piano $A-B$, positivo se tende le fibre longitudinali in B ;

$M^{(CD)}$ = momento flettente contenuto nel piano $C-D$, positivo se tende le fibre longitudinali in C ;

$N^{(l)}$ = sforzo normale parallelo all'asse della tubazione, positivo se è di trazione.

2.4.1 Pressione interna

La pressione interna, p_i , genera nelle pareti della tubazione uno stato uniforme di trazione. Il valore dello sforzo normale di parete può calcolarsi con la nota formula di Mariotte

$$N = \frac{p_i D}{2}$$

Nei calcoli, la pressione interna è stata posta pari al valore della pressione idrostatica aumentata della sovrappressione di colpo d'ariete (42,5 bar).

2.4.2 Peso proprio della tubazione

L'effetto del peso proprio è quello di indurre sforzi normali e momenti flettenti sulle pareti del tubo. Ipotizzando che il terreno espliciti la reazione su un arco di circonferenza di ampiezza 90° le sollecitazioni valgono:

$$M_A = 0,42\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_B = 0,64\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_C = M_D = -0,485\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$N_A = N_B = 0$$

$$N_C = N_D = -\frac{\pi}{2}\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right);$$

dove γ_s è il peso specifico dell'acciaio.

2.4.3 Peso dell'acqua contenuta nella tubazione

L'effetto è quello di provocare una ovalizzazione del tubo e, conseguentemente, nell'ipotesi che il riempimento avvenga a rinterro avvenuto, una reazione del terreno, q_H , ai fianchi della tubazione. Seguendo il ragionamento di De Saedeleer tale reazione vale (Fig.2):

$$q_H = k \frac{f_H}{2}$$

dove:

k = costante di Winkler del terreno;

$$f_H = \frac{a}{\frac{k}{2} + a} \varphi_H = \text{aumento effettivo del diametro orizzontale del tubo};$$

$$a = \frac{E_s I_p}{0,157(D/2)^4} = \text{coefficiente di rigidità del tubo};$$

$$\varphi_H = \frac{0,166\gamma_H (D/2)^5}{E_s I_p} = \text{aumento del diametro del tubo in assenza di contrasto laterale};$$

$$I_p = \frac{s^3}{12} = \text{momento di inerzia dell'unità di lunghezza della condotta}.$$

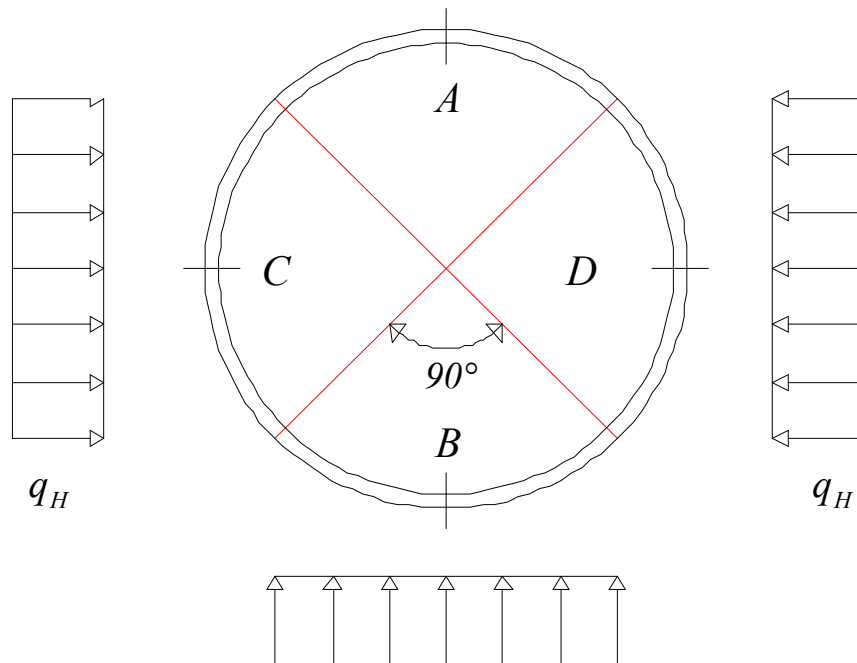


Fig.2 - Carichi sulla tubazione per effetto dell'acqua in essa contenuta

Pertanto, le sollecitazioni valgono:

$$M_A = 0,21\gamma_H \left(\frac{D}{2}\right)^3 - 0,218q_H \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_B = 0,32\gamma_H \left(\frac{D}{2}\right)^3 - 0,218q_H \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_C = M_D = -0,242\gamma_H \left(\frac{D}{2}\right)^3 + 0,238q_H \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$N_A = N_B = -\frac{q_H D}{2\sqrt{2}}$$

$$N_C = N_D = 0$$

2.4.4 Sovraccarico dovuto al materiale di ricoprimento

L'effetto del materiale di ricoprimento in un tubo in trincea può schematizzarsi attraverso una distribuzione di pressioni verticali di intensità uniforme, agenti negli archi superiore ed inferiore per una ampiezza di 90° (Fig.3).

Per le tubazioni l'intensità, p_v , si è calcolata con la formula

$$p_v = \sqrt{2}\gamma_t H$$

dove:

γ_t = peso specifico del terreno;

H_1 = altezza effettiva + altezza equivalente = $H + H_2 = 2,50 + 0,15 = 2,65$ m

Le pressioni verticali provocano un'ovalizzazione del tubo e, quindi, delle reazioni orizzontali del terreno sui fianchi della tubazione. Secondo la teoria di De Saedeleer, le pressioni orizzontali di reazione, q_r , del terreno, che possono ritenersi agenti su archi laterali di ampiezza 90°, valgono

$$q_r = k \frac{f_r}{2}$$

dove:

$f_r = \frac{a}{\frac{k}{2} + a} \varphi_r$ = aumento effettivo del diametro orizzontale del tubo;

$\varphi_r = \frac{0,166 p_v (D/2)^4}{E_s I_p}$ = aumento del diametro del tubo in assenza di contrasto laterale.

Le sollecitazioni indotte valgono:

$$M_A = M_B = 0,238 p_v \left(\frac{D}{2}\right)^2 - 0,218 q_r \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_C = M_D = -0,218 p_v \left(\frac{D}{2}\right)^2 + 0,238 q_r \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$N_A = N_B = -\frac{q_r D}{2\sqrt{2}}$$

$$N_C = N_D = -\frac{p_v D}{2\sqrt{2}}$$

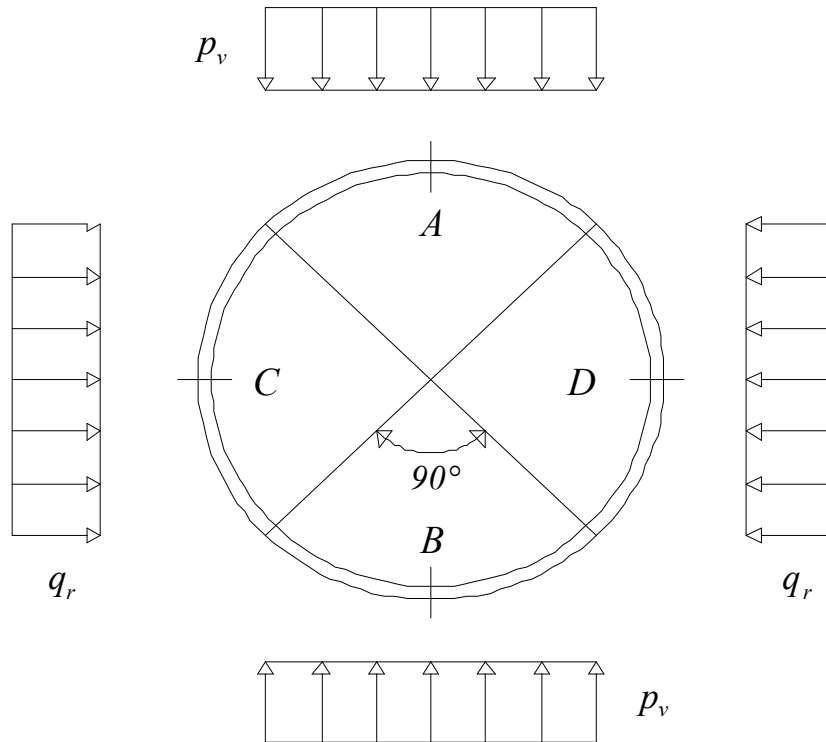


Fig.3 - Carico sulla tubazione per effetto del ricoprimento

2.4.5 Sollecitazioni dovute agli effetti termici

Essendo le condotte prive di giunti di dilatazione, la differenza tra la temperatura di chiusura della tubazione (temperatura del tubo al momento della chiusura, ossia della saldatura dell'ultima giunzione trasversale) e la temperatura dell'acqua, fa sorgere uno sforzo normale longitudinale calcolabile con la seguente formula

$$N_l = E_s A_t \alpha \Delta T$$

dove:

A_t = area della sezione trasversale del tubo;

α = coefficiente di dilatazione termica dell'acciaio ($\alpha = 0,000012 \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$);

ΔT = differenza tra la temperatura di chiusura della condotta e quella dell'acqua.

La differenza di temperatura è stata assunta pari a 10°C .

2.4.6 Spinte idrauliche in corrispondenza delle deviazioni angolari

L'effetto della spinta idraulica, S , è quello di produrre uno sforzo normale longitudinale calcolabile con la seguente formula

$$N_l = p_i \pi (D/2)^2 \text{sen} \alpha$$

dove:

D = diametro della tubazione;

p_i = pressione interna;

α = deviazione angolare.

2.4.7 Azioni sismiche

Le azioni sismiche provocano tensioni longitudinali, σ_l , nella condotta. Nell'ipotesi di perfetta aderenza tra terreno e tubazione, le onde sismiche che si propagano nella stessa direzione dell'asse della condotta generano la deformazione

$$\varepsilon_{la} = \frac{V_0}{c}$$

dove:

$V_0 = 0,1 * 2^{I-7}$ = velocità massima del suolo (I = grado di sismicità nella scala MSK);

c = velocità di propagazione delle onde di taglio nel terreno circostante la tubazione.

Le onde sismiche trasversali all'asse della condotta generano la deformazione longitudinale (per flessione della condotta)

$$\varepsilon_{lt} = \frac{A_0 D}{2c^2}$$

dove:

$A_0 = 0,1g * 2^{I-7}$ = accelerazione massima del suolo (g = acc. di gravità).

Essendo ε_{lt} molto piccola a confronto di ε_{la} , la deformazione longitudinale totale è data pressoché completamente da quest'ultima ($\varepsilon_l \cong \varepsilon_{la}$). Pertanto, risulta

$$\sigma_l = E_s \varepsilon_{la}$$

In pratica, tuttavia, è da ritenere che la condizione teorica di perfetta aderenza tra terreno e tubazione non possa attuarsi e, pertanto, il valore ottenuto è stato ridotto moltiplicandolo per un coefficiente che tiene conto dell'attrito terra-tubo.

Tale coefficiente si è assunto pari a $\tan\left(\frac{2}{3}\varphi\right)$, dove φ è l'angolo di attrito del terreno.

2.4.8 Depressioni all'interno della tubazione

L'effetto di una depressione, $p_d < 0$ genera nelle pareti della tubazione uno stato uniforme di compressione. Lo sforzo normale di parete vale

$$N = \frac{p_d D}{2}$$

per la depressione si è assunto $p_d = -1,033 \text{ kg/cm}^2$.

2.4.9 Sollecitazioni determinate da ovalizzazione della condotta

Si è seguito il ragionamento di Allievi supponendo che, per effetto della ovalizzazione, la originale forma circolare divenga una forma ellittica, geometricamente definita dalla lunghezza $D + \delta$ del semiasse maggiore e da quella $D - \delta$ del semiasse minore. δ è una lunghezza abbastanza piccola da potere essere trattata come elementare di fronte a D . D è tale che, per l'ammesso valore δ , dia luogo ad una ellisse con perimetro uguale a quella del cerchio originale.

Le sollecitazioni valgono:

$$M = \frac{EI_p D}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{2}{D} \right)$$

$$N = -\frac{p_{cr} D}{2}$$

dove r è il raggio di curvatura dell'ellisse nel punto preso in considerazione.

Nei calcoli si è posto $\delta = 0,01D$ assumendo che il semiasse maggiore dell'ellisse coincida con il diametro $A-B$.

2.4.10 Sovrapressioni conseguenti alle prove idrauliche in opera

Lo sforzo normale di trazione generato (costante su tutta la parete) vale:

$$N = \frac{PD}{2}$$

dove:

$$P = \frac{2^* \sigma^* s}{D} \text{ pressione di prova}$$

D = diametro esterno della tubazione

s = spessore tubazione in mm

$\sigma = f_{yk} * 70\%$ sollecitazione corrispondente al 70% della tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio costituente la condotta.

2.5 CALCOLO DELLE TENSIONI

Le tensioni indotte dalle sollecitazioni sono state calcolate con le formule della flessione composta, tenendo conto che, a causa dell'impedita dilatazione longitudinale, le tensioni circonferenziali fanno nascere tensioni longitudinali per effetto Poisson.

Si riportano di seguito le formule usate per il calcolo delle tensioni principali:

$$\begin{aligned}\sigma_c^{(A_i)} &= \frac{N^{(A)}}{s} + \frac{M^{(A)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(A_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(AB)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(A_i)} \\ \sigma_c^{(A_e)} &= \frac{N^{(A)}}{s} - \frac{M^{(A)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(A_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(AB)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(A_e)} \\ \sigma_c^{(B_i)} &= \frac{N^{(B)}}{s} + \frac{M^{(B)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(B_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(AB)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(B_i)} \\ \sigma_c^{(B_e)} &= \frac{N^{(B)}}{s} - \frac{M^{(B)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(B_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(AB)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(B_e)} \\ \sigma_c^{(C_i)} &= \frac{N^{(C)}}{s} + \frac{M^{(C)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(C_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(CD)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(C_i)} \\ \sigma_c^{(C_e)} &= \frac{N^{(C)}}{s} - \frac{M^{(C)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(C_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(CD)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(C_e)} \\ \sigma_c^{(D_i)} &= \frac{N^{(D)}}{s} + \frac{M^{(D)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(D_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(CD)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(D_i)} \\ \sigma_c^{(D_e)} &= \frac{N^{(D)}}{s} - \frac{M^{(D)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(D_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(CD)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(D_e)}\end{aligned}$$

dove:

ν_s = coefficiente di Poisson dell'acciaio ($\nu_s = 0,3$).

2.6 COMBINAZIONE DEI CARICHI

Al fine di determinare la situazione più gravosa per la condotta, sono stati considerati differenti combinazioni di carichi.

Per le combinazioni che coinvolgono solo carichi di carattere normale, si posto il coefficiente di sicurezza pari a 1,5 (ψ); invece per le combinazioni che coinvolgono carichi di carattere eccezionale si è posto pari a 1,25.

Per le combinazioni di carico in cui figura la pressione interna, i momenti di ovalizzazione prodotti dai carichi sono stati ridotti, in accordo alla teoria di Lazars, moltiplicandoli per il coefficiente di riduzione:

$$\alpha_r = \frac{1}{1 + \frac{p_i (D/2)^3}{3E_s I_p}}$$

Al fine di determinare la situazione più gravosa per la condotta, sono state considerate differenti combinazioni di carico così determinate:

$$\mathbf{A} = (1) + (2) + (3) + (4) \pm (5) + (6)$$

$$\mathbf{B} = (1) + (2) + (3) + (4) + (5) + (6) \pm (7)$$

$$\mathbf{C} = (2) + (3) + (4) \pm (5)$$

$$\mathbf{D} = (2) + (3) + (4) \pm (5) + (7)$$

$$\mathbf{E} = (2) + (3) + (4) \pm (5) + (8)$$

$$\mathbf{F} = (9)$$

$$\mathbf{G} = (2) + (3) + (6) + (10)$$

In appendice sono riportati insieme ai dati di progetto, i risultati delle verifiche effettuate.

Le verifiche sono state effettuate prendendo in considerazione la condiziona di esercizio più gravosa. Da esse emerge che la combinazione più gravosa è quella corrispondente alla combinazione **G** (peso proprio della tubazione, peso dell'acqua contenuta nella tubazione, spinte idrauliche in corrispondenza di deviazioni angolari, sovrappressioni conseguenti a prove idrauliche in opera), che conduce ad una tensioni equivalente pari a:

$$\text{DN 900} \quad \sigma_{\text{eq}} = 2449,70 \text{ kg/cm}^2$$

inferiore alla tensione massima ammissibile ($\sigma_{\text{amm}} = 2840 \text{ kg/cm}^2$).

3. VERIFICA DN 1100

Nell'ambito della realizzazione del by – pass sarà necessario effettuare l'attraversamento del rilevato dell'autostrada A19 Palermo – Catania; per tali attraversamenti dell'autostrada si prevede l'uso della tecnologia spingitubo. Il tubo camicia sarà in acciaio L355 DN 1100 spessore 12,50 mm realizzato secondo la norma UNI EN 10224. Le verifiche di resistenza saranno effettuate considerando uno spessore ridotto del 7,5% (tolleranza massima ammissibile per l'accettazione del tubo ai sensi della norma UNI EN 10224).

3.1 VERIFICHE DI RESISTENZA

Le verifiche di resistenza del materiale costituente la condotta sono state effettuate in corrispondenza dei punti $A_i, A_e, B_i, B_e, C_i, C_e, D_i$ e D_e (Fig.1). In particolare, in ciascuno di detti punti è stata verificata la seguente disuguaglianza

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\sigma_l^2 + \sigma_c^2 - \sigma_l \sigma_c + 3\tau_{lc}^2} \leq \frac{f_{yk}}{\psi}$$

dove:

σ_{eq} = tensione equivalente;

σ_l = tensione longitudinale (avente direzione dell'asse del tubo)

σ_c = tensione circonferenziale (avente direzione tangenziale alla circonferenza);

τ_{lc} = tensione tangenziale;

f_{yk} = 355 N/mm² tensione caratteristica di snervamento dell'acciaio costituente il tubo camicia;

ψ = coefficiente di sicurezza, dipendente dalla combinazione di carico esaminata.

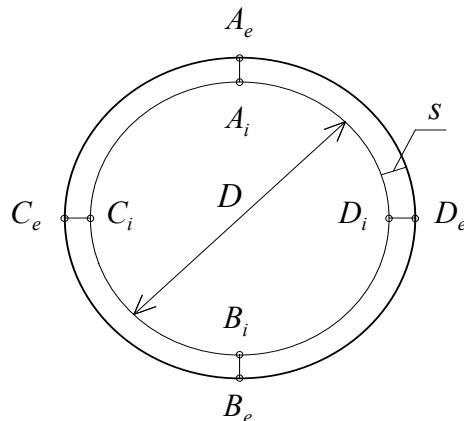


Fig.1 - Sezione trasversale della condotta e ubicazione dei punti di verifica

3.2 ANALISI DEI CARICHI

I carichi agenti sulla tubazione sono stati suddivisi in due gruppi, a seconda se essi agiscono durante il normale esercizio della condotta (*carichi di carattere normale*), o si verificano in condizioni eccezionali (*carichi di carattere saltuario e/o eccezionale*).

Nel caso specifico la tubazione sarà soggetta, oltre ai carichi di cui sopra, anche a quelli mobili dovuti al traffico veicolare che interessa la sede dell'autostrada A19 Palermo - Catania.

Nell'ambito delle verifiche che seguono il carico mobile verrà trasformato nello spessore di terreno che genera un carico equivalente sulla generatrice superiore della tubazione.

Per il calcolo del sovraccarico mobile, si utilizza lo schema di carico n°1 dei ponti di 1° categoria in accordo alle N.T.C. (D.M. 14/01/2008), che prevede il transito di un mezzo a due assi in tandem da 30 tonnellate ciascuno e un carico distribuito di 900 kg/m^2 , che si ripartiscono su un'impronta di $2,40 \times 1,60 \text{ m}$; con un carico totale (Q) pari a:

$$Q = (30000 * 2) + ((1,60 * 2,40) * 900) = 63456 \text{ kg.}$$

Ipotizzando la trasmissione del carico alla Winkler (45°) si calcola la superficie di ripartizione alla profondità pari all'altezza effettiva di ricoprimento rispetto sulla generatrice superiore del tubo camicia; per i due attraversamenti si avrà:

$$\text{- km 41 + 700} \rightarrow H = 6,52 \text{ m;}$$

$$\text{- km 44 + 200} \rightarrow H = 6,22 \text{ m.}$$

Pertanto in base alla teoria di Winkler si avrà:

- al km 41 + 700

$$a = 1,60 + 2 * 6,52 = 14,64 \text{ m}$$

$$b = 2,40 + 2 * 6,52 = 15,44 \text{ m}$$

$$A = 14,64 * 15,44 = 226,05 \text{ m}^2$$

- al km 44 + 200

$$a = 1,60 + 2 * 6,22 = 14,04 \text{ m}$$

$$b = 2,40 + 2 * 6,22 = 14,84 \text{ m}$$

$$A = 14,04 * 14,84 = 208,35 \text{ m}^2$$

Quindi a partire dal carico totale (Q) sarà possibile determinare il carico distribuito a m^2 (q) che agisce sulla tubazione nei due punti considerati

- al km 41 + 700

$$q = Q/A = 63456/226,05 = 280,72 \text{ kg/m}^2$$

- al km 44 + 200

$$q = Q/A = 63456/208,35 = 304,56 \text{ kg/m}^2.$$

In definitiva le due altezze equivalenti (H_2) saranno:

$$\text{- al km 41 + 700} \rightarrow H_2 = q/\gamma_t = 280,72/1900 = 0,15 \text{ m}$$

$$\text{- al km 44 + 200} \rightarrow H_2 = q/\gamma_t = 304,56/1900 = 0,16 \text{ m}.$$

Le verifiche di resistenza sono condotte con un'altezza di ricoprimento sulla generatrice superiore della tubazione data dalla somma dell'altezza effettiva e dell'altezza equivalente (H_1):

$$\text{- al km 41 + 700} \rightarrow H_1 = H + H_2 = H_1 = 6,52 + 0,15 = 6,67 \text{ m};$$

$$\text{- al km 44 + 200} \rightarrow H_1 = H + H_2 = H_1 = 6,22 + 0,16 = 6,38 \text{ m}.$$

3.2.1 Carichi di carattere normale

- (1) Peso proprio della tubazione;
- (2) Sovraccarico dovuto al terreno di ricoprimento.

3.2.2 Carichi di carattere saltuario e/o eccezionale

- (3) Azioni sismiche;
- (4) Sollecitazioni determinate da ovalizzazione della condotta;

3.3 CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI

Nel seguito si farà riferimento alla seguente simbologia:

a) Sollecitazioni per unità di lunghezza sulle pareti della condotta:

$M^{(A)}, M^{(B)}, M^{(C)}, M^{(D)} =$ momenti flettenti in corrispondenza delle sezioni $A, B, C,$ e D , positivi se tendono le fibre interne della tubazione;

$N^{(A)}, N^{(B)}, N^{(C)}, N^{(D)} =$ sforzi normali in corrispondenza delle sezioni $A, B, C,$ e D , positivi se sono di trazione;

b) Sollecitazioni sulle sezioni trasversali della condotta:

$M^{(AB)} =$ momento flettente contenuto nel piano $A-B$, positivo se tende le fibre longitudinali in B ;

$M^{(CD)} =$ momento flettente contenuto nel piano $C-D$, positivo se tende le fibre longitudinali in C ;

$N^{(l)} =$ sforzo normale parallelo all'asse della tubazione, positivo se è di trazione.

3.3.1 Peso proprio della tubazione

L'effetto del peso proprio è quello di indurre sforzi normali e momenti flettenti sulle pareti del tubo. Ipotizzando che il terreno espliciti la reazione su un arco di circonferenza di ampiezza 90° le sollecitazioni valgono:

$$M_A = 0,42\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_B = 0,64\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_C = M_D = -0,485\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$N_A = N_B = 0$$

$$N_C = N_D = -\frac{\pi}{2}\gamma_s s \left(\frac{D}{2}\right);$$

dove γ_s è il peso specifico dell'acciaio.

3.3.2 Sovraccarico dovuto al materiale di ricoprimento

L'effetto del materiale di ricoprimento in un tubo in trincea può schematizzarsi attraverso una distribuzione di pressioni verticali di intensità uniforme, agenti negli archi superiore ed inferiore per una ampiezza di 90° (Fig.3).

Per le tubazioni l'intensità, p_v , si è calcolata con la formula

$$p_v = \sqrt{2}\gamma_t H$$

dove:

γ_t = peso specifico del terreno;

H_1 = altezza effettiva + altezza equivalente = $H+H_2$.

Le pressioni verticali provocano una ovalizzazione del tubo e, quindi, delle reazioni orizzontali del terreno sui fianchi della tubazione. Secondo la teoria di De Saedeleer, le pressioni orizzontali di reazione, q_r , del terreno, che possono ritenersi agenti su archi laterali di ampiezza 90°, valgono

$$q_r = k \frac{f_r}{2}$$

dove:

$$f_r = \frac{a}{\frac{k}{2} + a} \varphi_r = \text{aumento effettivo del diametro orizzontale del tubo};$$

$$\varphi_r = \frac{0,166 p_v (D/2) 4}{E_s I_p} = \text{aumento del diametro del tubo in assenza di contrasto laterale}.$$

Le sollecitazioni indotte valgono:

$$M_A = M_B = 0,238 p_v \left(\frac{D}{2}\right)^2 - 0,218 q_r \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$M_C = M_D = -0,218 p_v \left(\frac{D}{2}\right)^2 + 0,238 q_r \left(\frac{D}{2}\right)^2$$

$$N_A = N_B = -\frac{q_r D}{2\sqrt{2}}$$

$$N_C = N_D = -\frac{p_v D}{2\sqrt{2}}$$

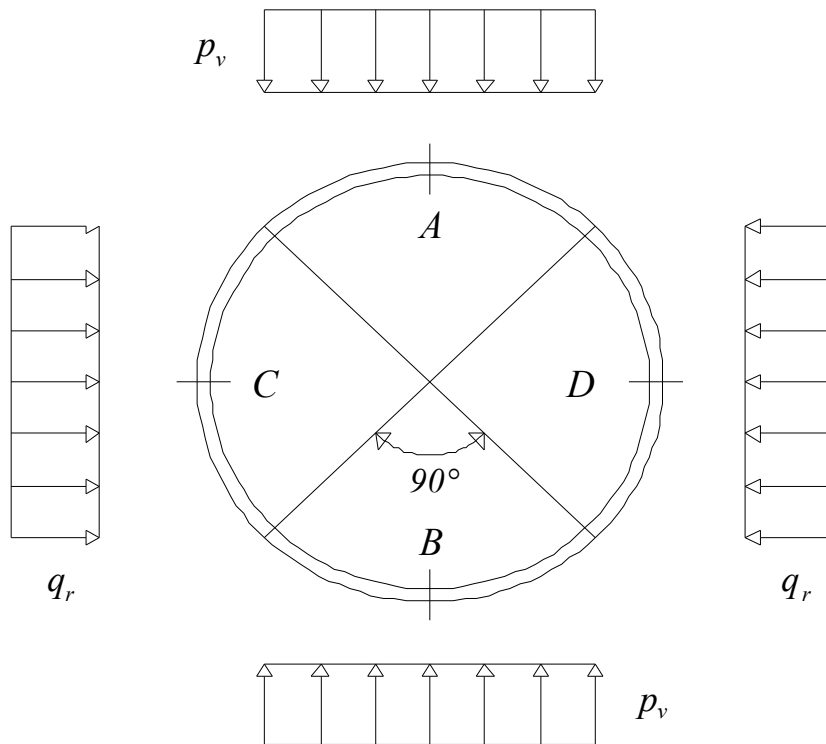


Fig.3 - Carico sulla tubazione per effetto del ricoprimento

3.3.3 Azioni sismiche

Le azioni sismiche provocano tensioni longitudinali, σ_l , nella tubazione. Nell'ipotesi di perfetta aderenza tra terreno e tubazione, le onde sismiche che si propagano nella stessa direzione dell'asse della condotta generano la deformazione

$$\varepsilon_{la} = \frac{V_0}{c}$$

dove:

$V_0 = 0,1 * 2^{I-7}$ = velocità massima del suolo (I = grado di sismicità nella scala MSK);

$c =$ velocità di propagazione delle onde di taglio nel terreno circostante la tubazione.

Le onde sismiche trasversali all'asse della condotta generano la deformazione longitudinale (per flessione della condotta)

$$\varepsilon_{lt} = \frac{A_0 D}{2c^2}$$

dove:

$A_0 = 0,1g * 2^{l-7}$ = accelerazione massima del suolo (g =acc. di gravità).

Essendo ε_{lt} molto piccola a confronto di ε_{la} , la deformazione longitudinale totale è data pressoché completamente da quest'ultima ($\varepsilon_l \cong \varepsilon_{la}$). Pertanto, risulta

$$\sigma_l = E_s \varepsilon_{la}$$

In pratica, tuttavia, è da ritenere che la condizione teorica di perfetta aderenza tra terreno e tubazione non possa attuarsi e, pertanto, il valore ottenuto è stato ridotto moltiplicandolo per un coefficiente che tiene conto dell'attrito terra-tubo.

Tale coefficiente si è assunto pari a $\tan\left(\frac{2}{3}\varphi\right)$, dove φ è l'angolo di attrito del terreno .

3.3.4 Sollecitazioni determinate da ovalizzazione della condotta

Si è seguito il ragionamento di Allievi supponendo che, per effetto della ovalizzazione, la originale forma circolare divenga una forma ellittica, geometricamente definita dalla lunghezza $D + \delta$ del semiasse maggiore e da quella $D - \delta$ del semiasse minore. δ è una lunghezza abbastanza piccola da potere essere trattata come elementare di fronte a D . D è tale che, per l'ammesso valore δ , dia luogo ad una ellisse con perimetro uguale a quella del cerchio originale.

Le sollecitazioni valgono:

$$M = \frac{EI_p D}{2} \left(\frac{1}{r} - \frac{2}{D} \right)$$

$$N = -\frac{P_{cr} D}{2}$$

dove r è il raggio di curvatura dell'ellisse nel punto preso in considerazione.

Nei calcoli si è posto $\delta = 0,01D$ assumendo che il semiasse maggiore dell'ellisse coincida con il diametro $A-B$.

3.4 CALCOLO DELLE TENSIONI

Le tensioni indotte dalle sollecitazioni sono state calcolate con le formule della flessione composta, tenendo conto che, a causa dell'impedita dilatazione longitudinale, le tensioni circonferenziali fanno nascere tensioni longitudinali per effetto Poisson.

Si riportano di seguito le formule usate per il calcolo delle tensioni principali:

$$\begin{aligned} \sigma_c^{(A_i)} &= \frac{N^{(A)}}{s} + \frac{M^{(A)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(A_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(AB)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(A_i)} \\ \sigma_c^{(A_e)} &= \frac{N^{(A)}}{s} - \frac{M^{(A)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(A_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(AB)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(A_e)} \\ \sigma_c^{(B_i)} &= \frac{N^{(B)}}{s} + \frac{M^{(B)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(B_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(AB)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(B_i)} \\ \sigma_c^{(B_e)} &= \frac{N^{(B)}}{s} - \frac{M^{(B)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(B_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(AB)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(B_e)} \\ \sigma_c^{(C_i)} &= \frac{N^{(C)}}{s} + \frac{M^{(C)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(C_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(CD)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(C_i)} \\ \sigma_c^{(C_e)} &= \frac{N^{(C)}}{s} - \frac{M^{(C)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(C_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} + \frac{M^{(CD)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(C_e)} \\ \sigma_c^{(D_i)} &= \frac{N^{(D)}}{s} + \frac{M^{(D)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(D_i)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(CD)}}{I_t} \frac{D}{2} + \nu_s \sigma_c^{(D_i)} \\ \sigma_c^{(D_e)} &= \frac{N^{(D)}}{s} - \frac{M^{(D)}}{I_p} \frac{s}{2} & \sigma_l^{(D_e)} &= \frac{N^{(l)}}{A_t} - \frac{M^{(CD)}}{I_t} \left(\frac{D}{2} + s \right) + \nu_s \sigma_c^{(D_e)} \end{aligned}$$

dove:

ν_s = coefficiente di Poisson dell'acciaio ($\nu_s = 0.3$).

3.5 COMBINAZIONE DEI CARICHI

Al fine di determinare la situazione più gravosa per la condotta, sono stati considerati differenti combinazioni di carichi.

Per le combinazioni che coinvolgono solo carichi di carattere normale, si è posto il coefficiente di sicurezza pari a 1,5 (ψ); invece per le combinazioni che coinvolgono carichi di carattere eccezionale si è posto pari a 1,25.

Al fine di determinare la situazione più gravosa per la condotta, sono state considerate differenti combinazioni di carico così determinate:

$$\mathbf{A} = (1) + (2)$$

$$\mathbf{B} = (1) + (2) \pm (3)$$

$$\mathbf{C} = (4)$$

In appendice sono riportati insieme ai dati di progetto, i risultati delle verifiche effettuate.

Le verifiche sono state effettuate prendendo in considerazione la condiziona di esercizio più gravosa. Da esse emerge che la combinazione più gravosa è quella corrispondente alla combinazione **B** (peso proprio della tubazione, sovraccarico dovuto al terreno di ricoprimento, azioni sismiche).

In ogni caso lo spessore minimo richiesto per assicurare la stabilità dell'equilibrio della condotta, $s=12,50 \text{ mm}$ per il DN 1100, è sufficiente a far fronte ai carichi che si prevedono agenti sulla condotta.

3.6 DATI E COEFFICIENTI DI BASE ADOTTATI NELLE VERIFICHE

Tubazioni DN 900

CARATTERISTICHE TUBAZIONI

Diametro (mm)	914
Spessore minimo calcolato (mm)	7,2
Spessore fissato (mm)	10
Peso specifico (N/m ³)	78500
Modulo elastico (N/mm ²)	210000
Coefficiente di Poisson	0,3
Coefficiente di dilatazione termica	0,000012
Tensione snervamento (N/mm ²)	355

CARATTERISTICHE TERRENO

Peso specifico (N/m ³)	19000
Costante di sottofondo (N/cm ³)	5
Angolo di attrito (gradi)	28
Veloc. prop. onde di taglio (m/sec)	300

CARICHI SULLA TUBAZIONE

Ricoprimento (m)	2,65
Variazione termica (gradi)	10
Grado di sismicità (MSK)	9

Tubazioni DN 1100

CARATTERISTICHE TUBAZIONI

Diametro (mm)	1118
Spessore fissato (mm)	12,5
Peso specifico (N/m ³)	78500
Modulo elastico (N/mm ²)	210000
Coefficiente di Poisson	0,3
Coefficiente di dilatazione termica	0,000012
Tensione snervamento (N/mm ²)	355

CARATTERISTICHE TERRENO

Peso specifico (N/m ³)	19000
Costante di sottofondo (N/cm ³)	5
Angolo di attrito (gradi)	28
Veloc. prop. onde di taglio (m/sec)	300

CARICHI SULLA TUBAZIONE

Ricoprimento (m)	6,67
Variazione termica (gradi)	0
Grado di sismicità (MSK)	9

APPENDICE
VERIFICHE DI RESISTENZA TUBAZIONE DN 900
H = 2,65 m

CARATTERISTICHE TUBAZIONI

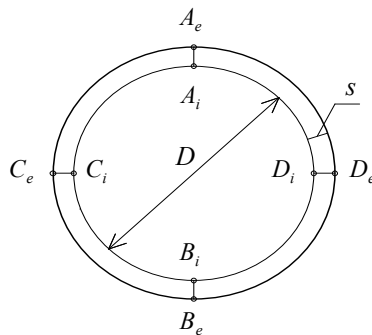
Diametro (mm)	914
Spessore minimo calcolato (mm)	7,2
Spessore fissato (mm)	10
Peso specifico (N/m ³)	78500
Modulo elastico (N/mm ²)	210000
Coefficiente di Poisson	0,3
Coefficiente di dilatazione termica	0,000012
Tensione snervamento (N/mm ²)	355

CARATTERISTICHE TERRENO

Peso specifico (N/m ³)	19000
Costante di sottofondo (N/cm ³)	5
Angolo di attrito (gradi)	28
Veloc. prop. onde di taglio (m/sec)	300

CARICHI SULLA TUBAZIONE

Ricoprimento (m)	2,65
Variazione termica (gradi)	10
Grado di sismicità (MSK)	9



Sezione trasversale della condotta e ubicazione dei punti di verifica

Tensioni per le singole condizioni di carico

(1) Pressione interna

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	204,54	204,54	204,54	204,54
$\sigma_l^{(i)}$	61,36	204,54	61,36	61,36
$\sigma_c^{(e)}$	204,54	204,54	204,54	204,54
$\sigma_l^{(e)}$	61,36	61,36	61,36	61,36

(2) Peso proprio tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	4,47	6,81	-5,21	-5,21
$\sigma_l^{(i)}$	1,34	2,04	-1,56	-1,56
$\sigma_c^{(e)}$	-4,47	-6,81	5,10	5,10
$\sigma_l^{(e)}$	-1,34	-2,04	1,53	1,53

(3) Peso dell'acqua contenuta nella tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	5,43	12,80	-6,89	-6,89
$\sigma_l^{(i)}$	1,63	3,84	-2,07	-2,07
$\sigma_c^{(e)}$	-5,62	-12,98	6,89	6,89
$\sigma_l^{(e)}$	-1,69	-3,89	2,07	2,07

(4) Peso ricoprimento

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	113,87	113,87	-84,76	-84,76
$\sigma_l^{(i)}$	34,16	34,16	-25,43	-25,43
$\sigma_c^{(e)}$	-116,78	-116,78	79,79	79,79
$\sigma_l^{(e)}$	-35,03	-35,03	23,94	23,94

(5) Effetti termici

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(i)}$	-25,20	-25,20	-25,20	-25,20
$\sigma_c^{(e)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(e)}$	-25,20	-25,20	-25,20	-25,20

(6) Spinte idrauliche deviazioni planimetriche

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	25,57	25,57	25,57	25,57
$\sigma_l^{(i)}$	85,22	85,22	85,22	85,22
$\sigma_c^{(e)}$	25,57	25,57	25,57	25,57
$\sigma_l^{(e)}$	85,22	85,22	85,22	85,22

(7) Sisma

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(i)}$	94,54	94,54	94,54	94,54
$\sigma_c^{(e)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(e)}$	94,54	94,54	94,54	94,54

(8) Depressioni all'interno della tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10
$\sigma_l^{(i)}$	-1,53	-1,53	-1,53	-1,53
$\sigma_c^{(e)}$	-5,10	-5,10	-5,10	-5,10
$\sigma_l^{(e)}$	-1,53	-1,53	-1,53	-1,53

(9) Ovalizzazione condotta

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	24,93	24,93	-13,94	-13,94
$\sigma_l^{(i)}$	7,48	7,48	-4,18	-4,18
$\sigma_c^{(e)}$	-14,72	-14,72	24,15	24,15
$\sigma_l^{(e)}$	-4,42	-4,42	7,24	7,24

(10) Prove idrauliche

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	248,50	248,50	248,50	248,50
$\sigma_l^{(i)}$	74,55	74,55	74,55	74,55
$\sigma_c^{(e)}$	248,50	248,50	248,50	248,50
$\sigma_l^{(e)}$	74,55	74,55	74,55	74,55

Tensioni ridotte in presenza di pressione interna nelle combinazioni di carico
(Coefficiente di riduzione di Lazard)

(3_{bis}) Peso dell'acqua contenuta nella tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	0,53	1,35	-0,77	-0,77
$\sigma_l^{(i)}$	0,16	0,41	-0,23	-0,23
$\sigma_c^{(e)}$	-0,71	-1,54	0,77	0,77
$\sigma_l^{(e)}$	-0,21	-0,46	0,23	0,23

(4_{bis}) Peso ricoprimento

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	11,47	11,47	-11,71	-11,71
$\sigma_l^{(i)}$	3,44	3,44	-3,51	-3,51
$\sigma_c^{(e)}$	-14,38	-14,38	6,73	6,73
$\sigma_l^{(e)}$	-4,31	-4,31	2,02	2,02

Tensioni ridotte in presenza di pressione di prova nella combinazione di carico 2+3+6+10
(Coefficiente di riduzione di Lazard)

(3_{ter}) Peso dell'acqua contenuta nella tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	0,35	0,93	-0,55	-0,55
$\sigma_l^{(i)}$	0,10	0,28	-0,16	-0,16
$\sigma_c^{(e)}$	-0,53	-1,12	0,55	0,55
$\sigma_l^{(e)}$	-0,16	-0,34	0,16	0,16

Tensioni per le combinazioni di carico esaminate

Combinazione di carico A (1+2+3_{bis}+4_{bis}+5+6)

f_{yk} 355 N/mm² σ_{amm} 236,67 N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	246,57	249,73	212,41	212,41
$\sigma_l^{(i)}$	126,32	127,27	116,08	116,08
$\sigma_c^{(e)}$	210,55	207,39	242,71	242,71
$\sigma_l^{(e)}$	115,52	114,57	125,17	125,17

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	213,55	216,29	184,22	184,22
$\sigma_{eq}^{(e)}$	182,63	179,93	210,23	210,23
$\sigma_{eq(max)}$	216,29			

Combinazione di carico A (1+2+3_{bis}+4_{bis}-5+6)

f_{yk} 355 N/mm² σ_{amm} 236,67 N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	246,57	249,73	212,41	212,41
$\sigma_l^{(i)}$	176,72	177,67	166,48	166,48
$\sigma_c^{(e)}$	210,55	207,39	242,71	242,71
$\sigma_l^{(e)}$	165,92	164,97	175,57	175,57

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	220,12	222,63	193,58	193,58
$\sigma_{eq}^{(e)}$	192,16	189,77	217,07	217,07
$\sigma_{eq(max)}$	222,63			

Combinazione di carico B (1+2+3_{bis}+4_{bis}+5+6+7)

f_{yk} 355 N/mm² σ_{amm} 284,00 N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	246,57	249,73	212,41	212,41
$\sigma_l^{(i)}$	220,87	221,81	210,62	210,62
$\sigma_c^{(e)}$	210,55	207,39	242,71	242,71
$\sigma_l^{(e)}$	210,06	209,11	219,71	219,71

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	234,77	237,01	211,52	211,52
$\sigma_{eq}^{(e)}$	210,31	208,25	232,07	232,07
$\sigma_{eq(max)}$	237,01			

Combinazione di carico B (1+2+3_{bis}+4_{bis}+5+6-7)

f_{yk} 355 N/mm² σ_{amm} 284,00 N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	246,57	249,73	212,41	212,41
$\sigma_l^{(i)}$	31,78	32,73	21,54	21,54
$\sigma_c^{(e)}$	210,55	207,39	242,71	242,71
$\sigma_l^{(e)}$	20,98	20,03	30,63	54,38

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	232,31	235,08	202,51	202,51
$\sigma_{eq}^{(e)}$	200,89	198,13	228,94	228,94
$\sigma_{eq(max)}$	235,08			

Combinazione di carico C (2+3+4+5)

f_{yk} 355 N/mm² σ_{amm} 236,67 N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	123,77	133,47	-96,86	-96,86
$\sigma_l^{(i)}$	11,93	14,84	-54,26	-54,26
$\sigma_c^{(e)}$	-126,86	-136,56	91,77	91,77
$\sigma_l^{(e)}$	-63,26	-66,17	2,33	2,33

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	118,25	126,70	84,09	84,09
$\sigma_{eq}^{(e)}$	109,87	118,29	90,63	90,63
$\sigma_{eq(max)}$	126,70			

Combinazione di carico C (2+3+4-5)

f_{yk} 355 N/mm² σ_{amm} 236,67 N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	123,77	133,47	-96,86	-96,86
$\sigma_l^{(i)}$	62,33	65,24	-3,86	-3,86
$\sigma_c^{(e)}$	-126,86	-136,56	91,77	91,77
$\sigma_l^{(e)}$	-12,86	-15,77	52,73	52,73

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	107,19	115,60	94,99	94,99
$\sigma_{eq}^{(e)}$	120,95	129,40	79,77	79,77
$\sigma_{eq(max)}$	129,40			

Combinazione di carico D (2+3+4+5+7)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	123,77	133,47	-96,86	-96,86
$\sigma_l^{(i)}$	106,47	109,38	28,37	40,28
$\sigma_c^{(e)}$	-126,86	-136,56	91,77	91,77
$\sigma_l^{(e)}$	31,28	28,37	96,87	96,87

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	116,09	123,20	122,09	122,09
$\sigma_{eq}^{(e)}$	145,06	152,74	94,43	94,43
$\sigma_{eq(max)}$	152,74			

Combinazione di carico D (2+3+4-5+7)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	123,77	133,47	-96,86	-96,86
$\sigma_l^{(i)}$	156,87	159,78	90,68	90,68
$\sigma_c^{(e)}$	-126,86	-136,56	91,77	91,77
$\sigma_l^{(e)}$	81,68	78,77	147,27	147,27

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	143,22	148,39	162,45	162,45
$\sigma_{eq}^{(e)}$	182,01	188,71	128,83	128,83
$\sigma_{eq(max)}$	188,71			

Combinazione di carico E (2+3+4+5+8)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	118,66	128,37	-101,97	-101,97
$\sigma_l^{(i)}$	10,40	13,31	-55,79	-55,79
$\sigma_c^{(e)}$	-131,97	-141,67	86,67	86,67
$\sigma_l^{(e)}$	-64,79	-67,70	0,80	0,80

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	113,82	122,26	88,44	88,44
$\sigma_{eq}^{(e)}$	114,29	122,73	86,27	86,27
$\sigma_{eq(max)}$	122,73			

Combinazione di carico E (2+3+4-5+8)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	118,66	128,37	-101,97	-101,97
$\sigma_l^{(i)}$	60,80	63,71	-5,39	-5,39
$\sigma_c^{(e)}$	-131,97	-141,67	86,67	86,67
$\sigma_l^{(e)}$	-14,39	-17,30	51,20	51,20

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	102,78	111,17	99,38	99,38
$\sigma_{eq}^{(e)}$	125,39	133,86	75,47	75,47
$\sigma_{eq(max)}$	133,86			

Combinazione di carico F (9)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	24,93	24,93	-13,94	-13,94
$\sigma_l^{(i)}$	7,48	7,48	-4,18	-4,18
$\sigma_c^{(e)}$	-14,72	-14,72	24,15	24,15
$\sigma_l^{(e)}$	-4,42	-4,42	7,24	7,24

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	22,15	22,15	12,39	12,39
$\sigma_{eq}^{(e)}$	13,08	13,08	21,46	21,46
$\sigma_{eq(max)}$	22,15			

Combinazione di carico G 2+3_{ter}+6+10

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	278,88	281,81	268,30	268,30
$\sigma_l^{(i)}$	161,22	162,10	158,05	158,05
$\sigma_c^{(e)}$	269,07	266,14	279,72	279,72
$\sigma_l^{(e)}$	158,27	157,40	161,47	161,47

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	242,50	244,97	233,58	233,58
$\sigma_{eq}^{(e)}$	234,23	231,77	243,20	243,20
$\sigma_{eq(max)}$	244,970			

APPENDICE
VERIFICHE DI RESISTENZA TUBAZIONE DN 1100
H = 6,52 m

CARATTERISTICHE TUBAZIONI

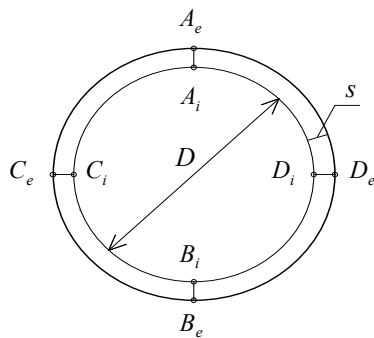
Diametro (mm)	1118
Spessore fissato (mm)	12,5
Peso specifico (N/m ³)	78500
Modulo elastico (N/mm ²)	210000
Coefficiente di Poisson	0,3
Coefficiente di dilatazione termica	0,000012
Tensione snervamento (N/mm ²)	355

CARATTERISTICHE TERRENO

Peso specifico (N/m ³)	19000
Costante di sottofondo (N/cm ³)	5
Angolo di attrito (gradi)	28
Veloc. prop. onde di taglio (m/sec)	300

CARICHI SULLA TUBAZIONE

Ricoprimento (m)	6,67
Variazione termica (gradi)	0
Grado di sismicit� (MSK)	9



Sezione trasversale della condotta e ubicazione dei punti di verifica

Tensioni per le singole condizioni di carico

(1) Peso proprio tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	5,35	8,15	-6,24	-6,24
$\sigma_l^{(i)}$	1,60	2,44	-1,87	-1,87
$\sigma_c^{(e)}$	-5,35	-8,15	6,10	6,10
$\sigma_l^{(e)}$	-1,60	-2,44	1,83	1,83

(2) Peso ricoprimento

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	254,78	254,78	-183,28	-183,28
$\sigma_l^{(i)}$	76,43	76,43	-54,98	-54,98
$\sigma_c^{(e)}$	-262,37	-262,37	171,02	171,02
$\sigma_l^{(e)}$	-78,71	-78,71	51,31	51,31

(3) Sisma

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(i)}$	94,54	94,54	94,54	94,54
$\sigma_c^{(e)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(e)}$	94,54	94,54	94,54	94,54

(4) Ovalizzazione condotta

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	24,78	24,78	-23,81	-23,81
$\sigma_l^{(i)}$	7,43	7,43	-7,14	-7,14
$\sigma_c^{(e)}$	-24,78	-24,78	23,81	23,81
$\sigma_l^{(e)}$	-7,43	-7,43	7,14	7,14

Tensioni per le combinazioni di carico esaminate

Combinazione di carico A (1+2)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **236,67** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	260,12	262,92	-189,52	-189,52
$\sigma_l^{(i)}$	78,04	78,88	-56,86	-56,86
$\sigma_c^{(e)}$	-267,72	-270,52	177,13	177,13
$\sigma_l^{(e)}$	-80,32	-81,16	53,14	53,14

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	231,20	233,69	168,45	168,45
$\sigma_{eq}^{(e)}$	237,95	240,44	157,43	157,43
$\sigma_{eq(max)}$	240,44			

Combinazione di carico B (1+2+3)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	260,12	262,92	-189,52	-189,52
$\sigma_l^{(i)}$	172,58	173,42	37,69	37,69
$\sigma_c^{(e)}$	-267,72	-270,52	177,13	177,13
$\sigma_l^{(e)}$	14,23	13,39	147,68	147,68

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	229,25	231,53	210,90	210,90
$\sigma_{eq}^{(e)}$	275,11	277,45	164,39	164,39
$\sigma_{eq(max)}$	277,45			

Combinazione di carico B (1+2-3)

$$f_{yk} \quad 355 \quad \text{N/mm}^2 \qquad \qquad \qquad \sigma_{amm} \quad 284,00 \quad \text{N/mm}^2$$

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	260,12	262,92	-189,52	-189,52
$\sigma_l^{(i)}$	-16,50	-15,66	-151,40	-151,40
$\sigma_c^{(e)}$	-267,72	-270,52	177,13	177,13
$\sigma_l^{(e)}$	-174,86	-175,70	-41,40	-41,40

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	268,76	271,10	173,63	173,63
$\sigma_{eq}^{(e)}$	235,45	237,74	201,05	201,05
$\sigma_{eq(max)}$	271,10			

Combinazione di carico C (4)

$$f_{yk} \quad 355 \quad \text{N/mm}^2 \qquad \qquad \qquad \sigma_{amm} \quad 236,67 \quad \text{N/mm}^2$$

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	24,78	24,78	-23,81	-23,81
$\sigma_l^{(i)}$	7,43	7,43	-7,14	-7,14
$\sigma_c^{(e)}$	-24,78	-24,78	23,81	23,81
$\sigma_l^{(e)}$	-7,43	-7,43	7,14	7,14

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	22,02	22,02	21,16	21,16
$\sigma_{eq}^{(e)}$	22,02	22,02	21,16	21,16
$\sigma_{eq(max)}$	22,02			

APPENDICE

VERIFICHE DI RESISTENZA TUBAZIONE DN 1100

H = 6,22 m

CARATTERISTICHE TUBAZIONI

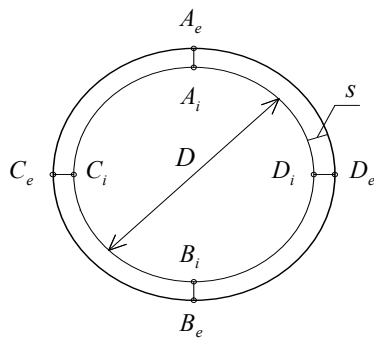
Diametro (mm)	1118
Spessore fissato (mm)	12,5
Peso specifico (N/m ³)	78500
Modulo elastico (N/mm ²)	210000
Coefficiente di Poisson	0,3
Coefficiente di dilatazione termica	0,000012
Tensione snervamento (N/mm ²)	355

CARATTERISTICHE TERRENO

Peso specifico (N/m ³)	19000
Costante di sottofondo (N/cm ³)	5
Angolo di attrito (gradi)	28
Veloc. prop. onde di taglio (m/sec)	300

CARICHI SULLA TUBAZIONE

Ricoprimento (m)	6,38
Variazione termica (gradi)	0
Grado di sismicità (MSK)	9



Sezione trasversale della condotta e ubicazione dei punti di verifica

Tensioni per le singole condizioni di carico

(1) Peso proprio tubazione

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	5,35	8,15	-6,24	-6,24
$\sigma_l^{(i)}$	1,60	2,44	-1,87	-1,87
$\sigma_c^{(e)}$	-5,35	-8,15	6,10	6,10
$\sigma_l^{(e)}$	-1,60	-2,44	1,83	1,83

(2) Peso ricoprimento

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	243,70	243,70	-175,31	-175,31
$\sigma_l^{(i)}$	73,11	73,11	-52,59	-52,59
$\sigma_c^{(e)}$	-250,97	-250,97	163,59	163,59
$\sigma_l^{(e)}$	-75,29	-75,29	49,08	49,08

(3) Sisma

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(i)}$	94,54	94,54	94,54	94,54
$\sigma_c^{(e)}$	0,00	0,00	0,00	0,00
$\sigma_l^{(e)}$	94,54	94,54	94,54	94,54

(4) Ovalizzazione condotta

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	24,78	24,78	-23,81	-23,81
$\sigma_l^{(i)}$	7,43	7,43	-7,14	-7,14
$\sigma_c^{(e)}$	-24,78	-24,78	23,81	23,81
$\sigma_l^{(e)}$	-7,43	-7,43	7,14	7,14

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	220,27	222,53	204,55	204,55
$\sigma_{eq}^{(e)}$	265,58	267,91	158,96	158,96
$\sigma_{eq(max)}$	267,91			

Combinazione di carico B (1+2-3)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	249,05	251,85	-181,55	-181,55
$\sigma_l^{(i)}$	-19,83	-18,99	-149,01	-149,01
$\sigma_c^{(e)}$	-256,31	-259,11	169,69	169,69
$\sigma_l^{(e)}$	-171,44	-172,28	-43,63	-43,63

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	259,53	261,86	167,66	167,66
$\sigma_{eq}^{(e)}$	226,15	228,43	195,20	195,20
$\sigma_{eq(max)}$	261,86			

Combinazione di carico C (4)

f_{yk} **355** N/mm² σ_{amm} **284,00** N/mm²

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_c^{(i)}$	24,78	24,78	-23,81	-23,81
$\sigma_l^{(i)}$	7,43	7,43	-7,14	-7,14
$\sigma_c^{(e)}$	-24,78	-24,78	23,81	23,81
$\sigma_l^{(e)}$	-7,43	-7,43	7,14	7,14

	A	B	C	D
	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²	N/mm ²
$\sigma_{eq}^{(i)}$	22,02	22,02	21,16	21,16
$\sigma_{eq}^{(e)}$	22,02	22,02	21,16	21,16
$\sigma_{eq(max)}$	22,02			