

Condotte in PVC: Qualità, Prestazioni e Impatto Ambientale

Fiera Accadueo - Ferrara

**Le interazioni terreno-tubazioni:
la posa corretta e le soluzioni conformi**

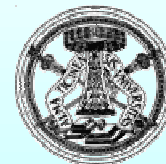
Sergio Papi

Dipartimento di Ingegneria Idraulica e Ambientale

Università degli Studi di Pavia

Via Ferrata, 1 - 27100 - Pavia

papi@unipv.it



Ferrara, 22 Maggio 2008

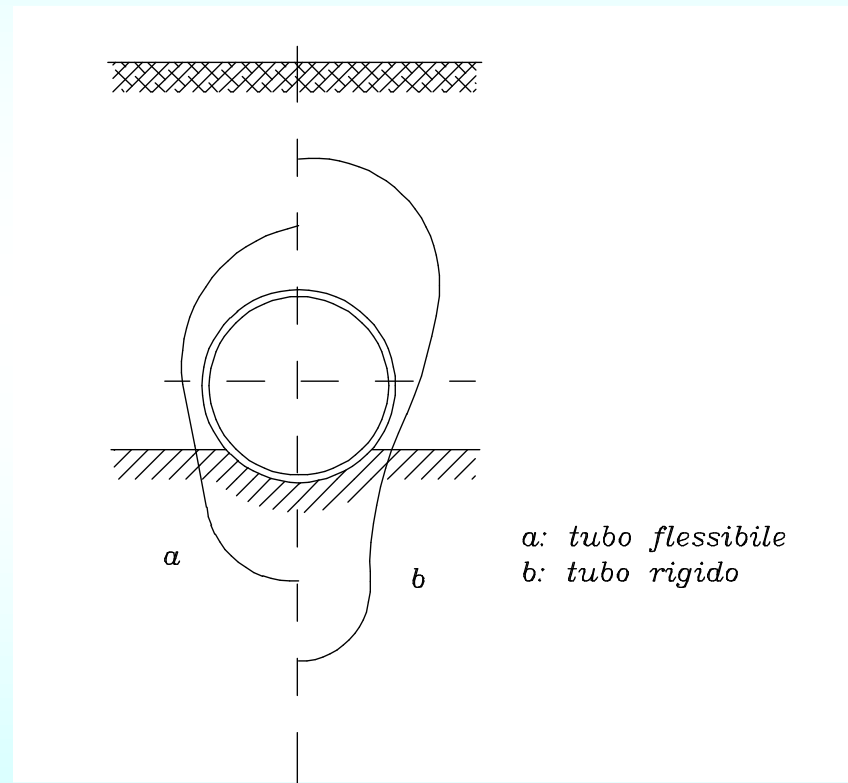
PRESUPPOSTO FONDAMENTALE DI UN BUON COMPORTAMENTO IDRAULICO DI UNA CONDOTTA E' LA SUA INTEGRITA' STRUTTURALE, DA STABILIRE CON UN'ACCURATA VERIFICA STATICA

LA VERIFICA STATICA DI UNA TUBAZIONE CONSISTE NELL'ACCERTARE CHE I CARICHI AGENTI SULLA STRUTTURA PROVOCHINO TENSIONI E DEFORMAZIONI AMMISSIBILI.

SE LA STRUTTURA E' MOLTO RIGIDA, LA FUNZIONALITA' E' SODDISFATTA QUANDO LO STATO DI COAZIONE INTERNO E' COMPATIBILE CON LE TENSIONI AMMISSIBILI DEL MATERIALE.

SE LA STRUTTURA E' FORTEMENTE DEFORMABILE BISOGNA CONTROLLARE CHE LA DEFLESSIONE DIAMETRALE SIA COMPATIBILE CON I VINCOLI DI PROGETTO E CHE NON SI ABBAIA SCHIACCIAMENTO PER INSTABILITA' ELASTICA

LE SOLLECITAZIONI SU UN TUBO INTERRATO DIPENDONO DALL'INTERAZIONE TUBO-TERRENO, FORTEMENTE LEGATA ALLA DEFORMABILITA RELATIVA DEI DUE ELEMENTI: se il tubo si deforma di più del terreno che lo circonda, sarà sollecitato in modo minore poiché deformandosi sensibilmente coinvolge il terreno di rinfianco a collaborare alla resistenza.



Distribuzione delle componenti normali alla superficie del tubo delle pressioni d'appoggio e di rinterro [Arredi, 1972]

DALLA DEFORMABILITA' RELATIVA TUBO-TERRENO DIPENDE IL COMPORTAMENTO STATICO DELLA CONDOTTA.

EMERGE, QUINDI, LA CONVENIENZA A CLASSIFICARE LE TUBAZIONI IN BASE ALL'ELASTICITA' IN SITO.

SI DEFINISCE COEFFICIENTE DI ELASTICITA' IN SITO DI UNA TUBAZIONE DI DIAMETRO ESTERNO D , DI SPESSORE S E MODULO ELASTICO E_t , POSATA IN UN TERRENO DI MODULO ELASTICO E_s , IL NUMERO ADIMENSIONALE

$$N = \frac{E_s}{E_t} \left(\frac{R}{S} \right)^3$$

**DOVE R E' IL RAGGIO MEDIO DELLA TUBAZIONE ($D - S/2$)
LA TUBAZIONE INTERRATA E' FLESSIBILE (O DEFORMABILE)
SE RISULTA $N \geq 1$**

TUBAZIONI RIGIDE- SEMIRIGIDE- FLESSIBILI

TUBAZIONI RIGIDE:

**CALCESTRUZZO
GRES
FIBROCEMENTO**

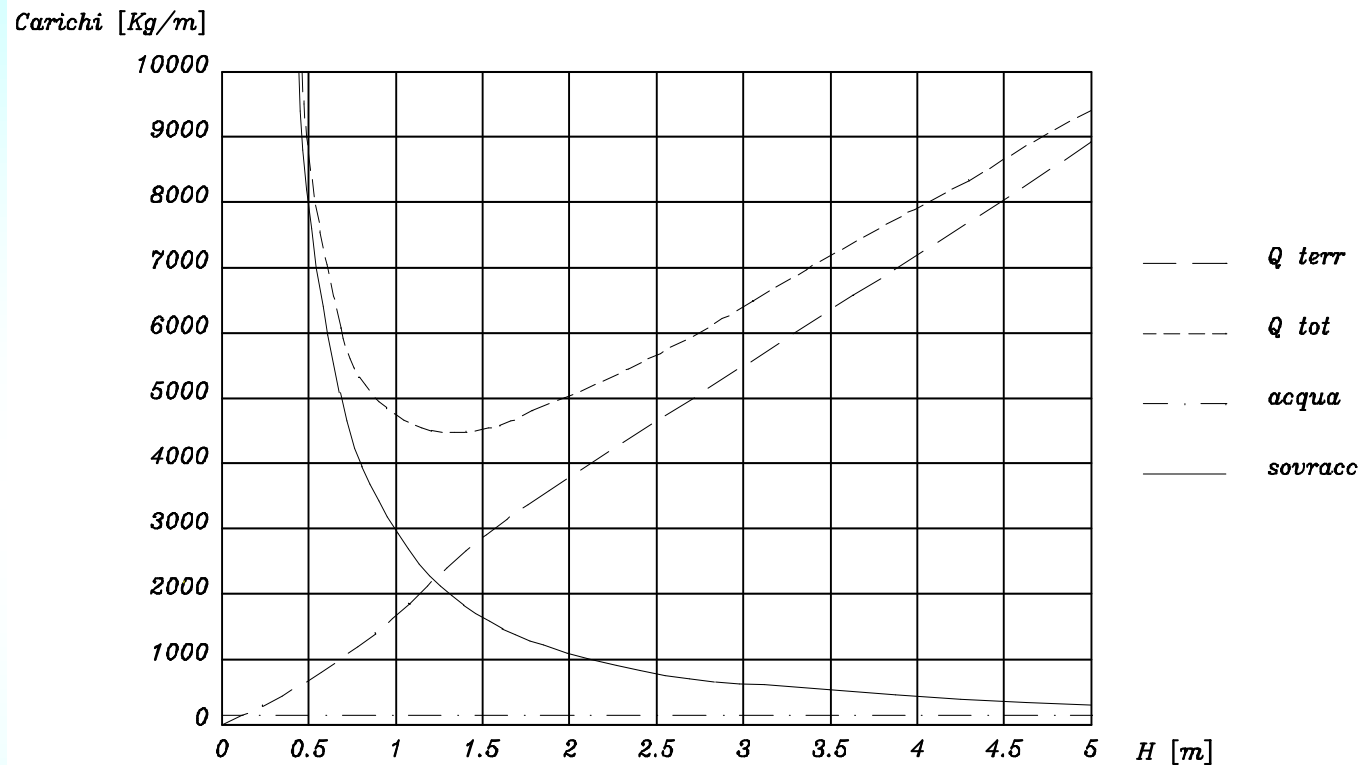
TUBAZIONI SEMIRIGIDE:

**ACCIAIO
GHISA**

TUBAZIONI FLESSIBILI:

**PVC
PE
PP
PRFV**

Risultante dei carichi ovalizzanti (esempio)



La curva della risultante dei carichi ovalizzanti in funzione dell'altezza H di rinterro, per tubazioni posate in strade a traffico pesante, presenta un minimo per H compreso fra 1,25 m e 1,75 m, qualunque sia il diametro D della condotta.

TUBAZIONI RIGIDE

NELLE **TUBAZIONI RIGIDE** LA RESISTENZA MASSIMA SOTTO CARICO E' LIMITATA DA UNO STATO LIMITE ULTIMO DI ROTTURA SENZA DEFORMAZIONE SIGNIFICATIVA DELLA SEZIONE.

LA STABILITA' E' VERIFICATA SE RISULTA

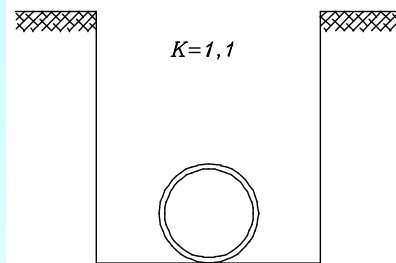
$$Q_t \leq \frac{KQ}{\mu}$$

Q_t E' IL CARICO ESTERNO TOTALE DI SCHIACCIAMENTO

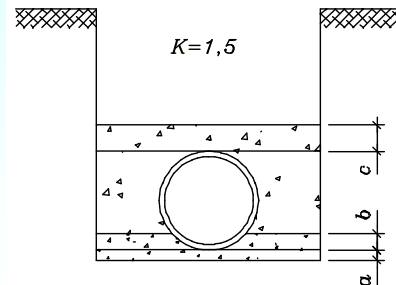
Q E' IL CARICO DI ROTTURA PER SCHIACCIAMENTO OTTENUTO IN LABORATORIO

K E' UN COEFFICIENTE DI POSA : ≥ 1

μ E' IL COEFFICIENTE DI SICUREZZA ALLO SCHIACCIAMENTO: 1,3÷1,5



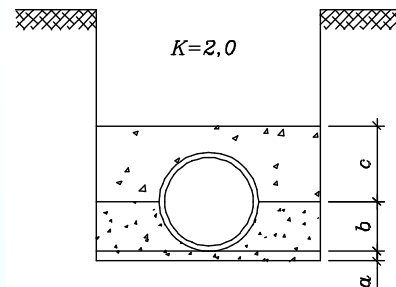
Tipo 1
 Semplice appoggio sul fondo della trincea
 Rinterro non costipato eseguito con
 materiale di scavo.



Tipo 2
 Appoggio su letto di materiale granulare
 fine e rinterro con materiale granulare
 fine o con materiale proveniente dagli
 scavi leggermente costipato.

$$a = 0,10 \text{ m} + \frac{1}{10} D$$

$$b = \frac{1}{6} D \quad c \geq 0,30$$

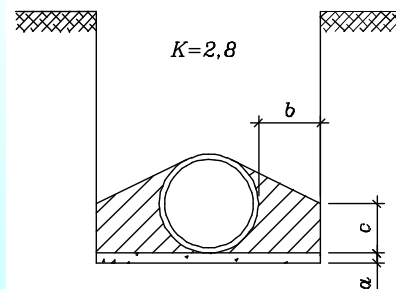


Tipo 3
 Appoggio su letto di materiale granulare
 fine e rifianco con materiale granulare
 fine entrambi accuratamente costipati.
 Rinterro leggermente costipato esente
 da zolle.

$$a = 0,10 \text{ m} + \frac{1}{10} D$$

$$b = 0,5 D$$

$$c = 0,5 D + 0,30 \text{ m}$$



Tipo 4
 Appoggio su letto di materiale granulare
 fine e parziale colmataura in calcestruzzo
 degli spazi laterali.

$$a = 0,10 \text{ m} + \frac{1}{10} D$$

$$b = \frac{1}{4} D \text{ (min. } 0,10 \text{ m)}$$

$$c \geq \frac{1}{3} D$$

Tipi di posa e relativi coefficienti K.

TUBAZIONI FLESSIBILI

NELLE TUBAZIONI FLESSIBILI LA RESISTENZA MASSIMA SOTTO CARICO E' LIMITATA DA UNO STATO LIMITE ULTIMO DI DEFORMAZIONE SENZA IL RAGGIUNGIMENTO DI UNO STATO DI FESSURAZIONE

OPERAZIONI DA EFFETTUARE PER LA VERIFICA STATICA:

- 1. CALCOLO E VERIFICA DELL'INFLESSIONE DIAMETRALE A LUNGO TERMINE**
- 2. CALCOLO E VERIFICA DEL CARICO CRITICO DI COLLASSO**
- 3. CALCOLO E VERIFICA DELLA SOLLECITAZIONE O DEFORMAZIONE A FLESSIONE DELLA SEZIONE**

Rigidità trasversale delle tubazioni flessibili

Le tubazioni flessibili sono classificate in base alla loro rigidità anulare SN (kN/m^2). Per il PVC la norma prevede tre classi di rigidità anulare nominale : 2 – 4 – 8.

La rigidità anulare è fornita dalla seguente espressione:

$$RG = \frac{E_t I}{D_m^3}$$

- E_t è il modulo di elasticità del materiale costituente il tubo;
- I è il momento di inerzia di una lunghezza unitaria del tubo ($I = S^3/12$ con S spessore della parete strutturale);
- D_m è il diametro medio della tubazione ($D - S/2$)

Ad una diversa rigidità anulare corrisponde un diverso spessore nominale di parete e quindi un diverso rapporto dimensionale normalizzato SDR (approssimativamente uguale al rapporto fra il diametro nominale (esterno) e lo spessore nominale di parete).

IL CALCOLO DELL'INFLESSIONE DIAMETRALE A LUNGO TERMINE (95% di probabilità)

$$\Delta Y = \frac{(DeWc + Wl)Kx}{8RG + 0,061KaEs} + \Delta a$$

- **Δy** è l'inflessione verticale del tubo [cm];
- **De** è il fattore di ritardo d'inflessione (senza dimensione) che tiene conto che il terreno continua a costiparsi nel tempo (1,5-2,0 : cfr. Tab.);
- **Wc** è il carico verticale del suolo sul tubo per unità di lunghezza [N/cm];
- **WL** è il carico mobile sul tubo per unità di lunghezza [N/cm];
- **Kx** è il coefficiente d'inflessione (senza dimensione), che dipende dalla capacità di sostegno fornita dal suolo all'arco inferiore di appoggio del tubo (0,083 – 0,11 : cfr.Tab.);
- **RG** è la rigidità a lungo termine del tubo [N/cm²]; ~ 1/2 della rigidità iniziale per PVC
- **Es** è il modulo elastico del terreno (cfr. Tab.) [N/cm²];
- **$Ka, \Delta a$** sono parametri che consentono di passare dall'inflessione media (50% di probabilità) all'inflessione massima caratteristica (frattile di ordine 0,95 della distribuzione statistica dell'inflessione) (normalmente **$Ka= 0,75$** e **$\Delta a= 0$** - cfr. Tab.)

Tab. - **Fattore di ritardo d'inflexione D_e**

TIPO DI RINTERRO E GRADO DI COSTIPAMENTO	D_e
Rinterro poco profondo con grado di costipamento da moderato a elevato	2,0
Materiale scaricato alla rinfusa o grado di costipamento leggero (scarso)	1,5

Tab. - **Coefficiente di inflexione K_x**

TIPO DI INSTALLAZIONE	ANGOLO EQUIVAL. DI LETTO, IN GRADI	COEFFICIENTE K_x
Fondo sagomato con materiale di riempimento ben costipato ai fianchi del tubo (densità Proctor $\geq 95\%$) o materiale di letto e rinfiacco di tipo ghiaioso leggermente costipato (densità Proctor $\geq 70\%$)	180	0,083
Fondo sagomato con materiale di riempimento moderatamente costipato ai fianchi del tubo (densità Proctor $\geq 85\%$ e $< 95\%$) o materiale di letto e rinfiacco di tipo ghiaioso	60	0,103
Fondo piatto con materiale di riempimento sciolto posato ai fianchi del tubo (non raccomandato)	0	0,110

Tab. - **Valori dei parametri K_a e Δ_a**

ALTEZZA H DEL RINTERRO [m]	Δ_a	K_a
$H \leq 4,9$ m	0	0,75
$H > 4,9$ m e materiale scaricato alla rinfusa e con leggero grado di costipamento	0,02 D	1,0
$H > 4,9$ m e materiale con moderato grado di costipamento	0,01 D	1,0
$H > 4,9$ m e materiale con elevato grado di costipamento	0,005 D	1,0

Valori medi del modulo di elasticità del suolo che avvolge la tubazione («modulus of soil reaction»)

VALORI DI E_s IN FUNZIONE DEL TIPO E DEL GRADO DI COMPATTAZIONE DEL MATERIALE CHE AVVOLGE LA TUBAZIONE [kgf/cm²]

TIPO DI SUOLO - MATERIALE CHE AVVOLGE LA TUBAZIONE	scaricato alla rinfusa	costipamento leggero < 85% proctor < 40% densità rel.	costipamento moderato 85,95% proctor 40,70% dens. rel.	costipamento elevato > 95% proctor > 70% dens. rel.
a) Suoli a grana fine, con meno del 25% di particelle a grana grossolana; plasticità da media a nulla.	3,4	14	28	70
c) Suoli a grana fine, con più del 25% di particelle a grana grossolana; plasticità da media a nulla. Suoli a grana grossolana con più del 12% di fini	7	28	70	140
c) Suoli a grana grossolana con pochi fini o nessuno (< 12% di fini)	14	70	140	211
d) Roccia frantumata	70	-	211	-

Appartengono al gruppo a) i seguenti suoli: argille inorganiche con plasticità da bassa a media - limo inorganico e sabbia molto fine

Appartengono al gruppo b) i seguenti suoli: quelli del gruppo a), ma con più del 25% di particelle a grana grossolana - miscele di ghiaia, sabbia e limo (o argilla) mal graduate - sabbie con limo

Appartengono al gruppo c) i seguenti suoli: misture di ghiaia e sabbia con pochi fini o nessuno - sabbie ghiaiose con pochi fini o nessuno

Cosa condiziona maggiormente l'inflessione diametrale

- La relazione che fornisce il valore dell'inflessione diametrale consente di valutare l'influenza relativa sull'ovalizzazione del modulo di reazione del terreno e della rigidità flessionale della tubazione.
- **Il termine $0,061 K_a E_s$ è di un ordine di grandezza maggiore del termine $8RG$.**
- L'inflessione è fortemente dipendente dal modulo di reazione del suolo e praticamente inversamente proporzionale al medesimo, **mentre dipende relativamente poco dal fattore di rigidità della tubazione** e di conseguenza è anche poco influenzata dal decadimento nel tempo delle caratteristiche meccaniche (diminuzione di E_t).
- **Ai fini del contenimento dell'inflessione** è quindi più conveniente agire sul miglioramento delle condizioni di posa (sottofondo e rinfiacco con terreno a grana grossolana e costipamento del rinfiacco) piuttosto che sull'aumento dell'indice di rigidità delle tubazioni impiegate.

Verifica all'instabilità all'equilibrio elastico

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

Il carico critico per unità di superficie che provoca la deformazione a due lobi è pari a:

$$p_{cr.} = 3 \frac{E_t \cdot I}{r^3} = 24RG$$

- La forza critica per unità di lunghezza che determina l'instabilità elastica è ovviamente :

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

Verifica all'instabilità all'equilibrio elastico

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

La norma ANSI-AWWA C 950-88 fornisce la seguente espressione di stima della **pressione ammissibile di buckling**:

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

dove:

q_a è la pressione ammissibile di buckling in N/cm²;

FS è il fattore di progettazione = 2,5;

R_w è il fattore di spinta idrostatica della falda eventualmente presente:

$$R_w = 1 - 0,33 (H_w/H) \quad \text{con } 0 \leq H_w \leq H;$$

B' è il coefficiente empirico di supporto elastico (adimensionale) fornito dalla relazione:

$$B' = 1 / (1 + 4e-0,213 H);$$

H è l'altezza di rinterro in cm;

H_w è l'altezza della superficie libera della falda sulla sommità della tubazione in cm.

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

La verifica all'instabilità elastica si esegue confrontando la pressione ammissibile di buckling q_a con la risultante della pressione dovuta ai carichi esterni applicati.

La norma ANSI-AWWA considera due casi:

- depressione interna a causa di transitori;
- sovraccarichi mobili.

In presenza di depressione interna dovrà risultare:

$$\gamma_w \cdot H_w + R_w \cdot \frac{W_c}{D} + P_v \leq q_a$$

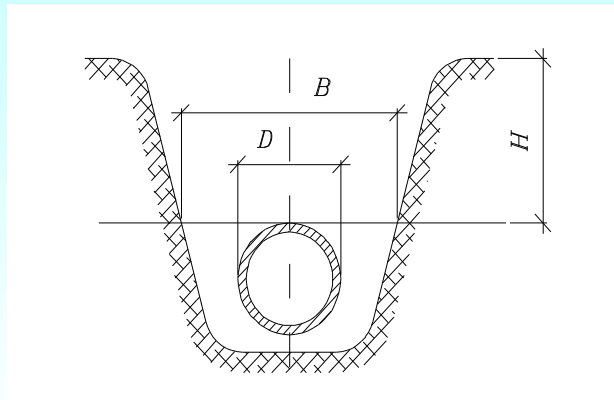
In presenza di sovraccarichi mobili dovrà risultare:

$$\gamma_w \cdot H_w + R_w \cdot \frac{W_c}{D} + \frac{W_L}{D} \leq q_a$$

- γ_w è il peso specifico dell'acqua in N/cm³;
- H_w è l'altezza della superficie libera della falda sulla sommità della tubazione in cm.
- p_v è la depressione interna in N/cm² (pressione atmosferica meno pressione assoluta interna);

Quando la verifica all'instabilità elastica non è soddisfatta converrà in generale prevedere l'uso di una tubazione a più elevato indice di rigidità; **raddoppiando RG si aumenta la pressione ammissibile del 41%**; si potrà intervenire comunque anche migliorando E_s .

Posa delle tubazioni in trincea



- L'inflessione diametrale e la pressione massima ammissibile di buckling, in una tubazione flessibile interrata dipendono in maniera determinante dal modulo di elasticità del suolo e quindi dal tipo di terreno utilizzato per il sottofondo e il rinfiacco della tubazione e dal suo grado di costipamento.
- Il progettista dovrà accuratamente definire le condizioni di posa e valutare se queste possono, nel tempo, subire alterazioni per effetto di altri interventi antropici, quali ad esempio posa di altri sottoservizi in adiacenza.
- Il Direttore dei Lavori dovrà accertare che le modalità esecutive dell'opera consentano di ottenere i requisiti di posa previsti in progetto.
- E' da osservare che pose a piccola profondità ($H \leq 1,5$ m) difficilmente potranno risultare stabili nel tempo se non protette.

Raccomandazioni per l'installazione

- **LA LARGHEZZA DELLA TRINCEA AL FONDO NON DEVE ESSERE MAGGIORE DI QUANTO STRETTAMENTE NECESSARIO PER L'ESECUZIONE DELLE GIUNZIONI E PER LA COMPATTAZIONE DEL MATERIALE DI RINFIANCO, SE RICHIESTA.**
- **AL FINE DI AVERE UN SUPPORTO UNIFORME PER TUTTA LA LUNGHEZZA, SI DEVE REALIZZARE UN LETTO DI POSA IN MATERIALE GRANULARE (ROCCIA FRANTUMATA GHIAIETTO, SABBIA) DELLO SPESSORE DI 100-150 mm.**
- **IL MATERIALE DEL LETTO VA STESO UNIFORMEMENTE SU TUTTA LA LARGHEZZA DELLA TRINCEA E VA LIVELLATO AL GRADIENTE DELLA TUBAZIONE, MA NON COMPATTATO.**
- **IL TUBO VA POSATO NELLA TRINCEA IN MANIERA TALE CHE SIA SORRETTO UNIFORMEMENTE, SUL LETTO DI POSA, SU TUTTA LA SUA LUNGHEZZA (realizzare nicchie per i bicchieri)**

Raccomandazioni per l'installazione

- **IL MATERIALE DI SOTTOFONDO E RINFIANCO DEVE ESSERE INSTALLATO IN MODO DA EVITARE LA SUA MIGRAZIONE NEL TERRENO ESISTENTE (IN ALCUNE CIRCOSTANZE PUO' ESSERE NECESSARIO USARE UN TESSUTO GEOTESSILE)**
- **LA RIMOZIONE DELLA CASSERATURA DI CONTENIMENTO DEVE ESSERE EFFETTUATA PROGRESSIVAMENTE DURANTE LA POSA IN OPERA DEL MATERIALE DI RINFIANCO (LA RIMOZIONE A RINTERRO ESEGUITO PUO' GENERARE GRAVI CONSEGUENZE SULLA RESISTENZA MECCANICA)**
- **EVITARE ASSOLUTAMENTE POSE CON ALTEZZA DI RINTERRO MINORE DI 1 METRO (PREFERIBILMENTE $\geq 1,5$ M)**
- **NON IMPIEGARE CALCESTRUZZO PER RINFIANCO E RICOPRIMENTO DELLE TUBAZIONI FLESSIBILI**

Raccomandazioni per l'installazione

- **LA CONNESSIONE DI UNA TUBAZIONE CON UNA STRUTTURA RIGIDA** (es. pozzetto) VA EFFETTUATA INSERENDO NELLA STRUTTURA UNA GIUNZIONE FLESSIBILE E COMPATTANDO ACCURATAMENTE IL MATERIALE DEL LETTO IN ADIACENZA DELLA STRUTTURA
- **LA SCELTA DELLA RIGIDEZZA DELLA CONDOTTA** VA FATTA SULLA BASE DELLE CARATTERISTICHE DEL SUOLO NATIVO, DEL TIPO DI MATERIALE DI SOTTOFONDO E RINFIANCO E DELLA SUA COMPATTAZIONE, DELLE CONDIZIONI DI CARICO (in conformità a quanto previsto dalla norma tecnica **UNI ENV 1046:2003**)
- **IN ZONE SOGGETTE A TRAFFICO VEICOLARE UTILIZZARE TUBAZIONI CON $RG \geq 4000 \text{ N/m}^2$**
- **SI DEVE COLLAUDARE LA TENUTA ALL'ACQUA DELLA TUBAZIONE, POSSIBILMENTE COMPRESI RACCORDI E POZZETTI**

GRAZIE

PER L'ATTENZIONE