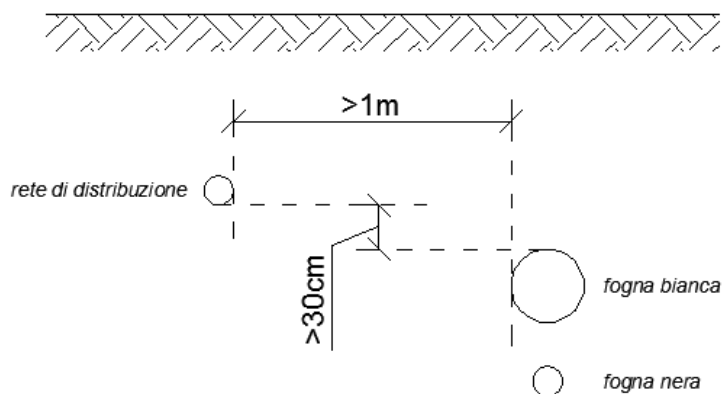


POSA IN OPERA E COLLAUDO DELLE CONDOTTE

Abbiamo visto come la posa delle condotte avvenga generalmente interrando per una certa profondità al di sotto del piano campagna o, più frequentemente, al di sotto del piano stradale. Nel caso delle tubazioni per acquedotto, ciò risulta necessario per fornire un'adeguata protezione al fluido convogliato, sia per quanto riguarda la conservazione delle caratteristiche organolettiche (protezione termica) che per evitare la possibilità di contaminazione intenzionale; nel caso delle condotte fognarie, ciò è dovuto alla necessità di raccogliere i reflui delle utenze e le acque meteoriche dalle superfici per semplice gravità.

La **profondità di posa** dipende dalla funzione della tubazione e dalle condizioni in sito: soprattutto in corrispondenza dei centri cittadini, infatti, la coesistenza di più reti di sottoservizi comporta la necessità di organizzare lo spazio disponibile posizionando ciascuna di esse ad un diverso livello.



In generale, per il servizio idrico si ritiene vantaggioso dal punto di vista economico posizionare le condotte ad una profondità compresa tra **1.20 - 1.30m** nei centri cittadini e intorno a **1.50m** per gli acquedotti esterni.

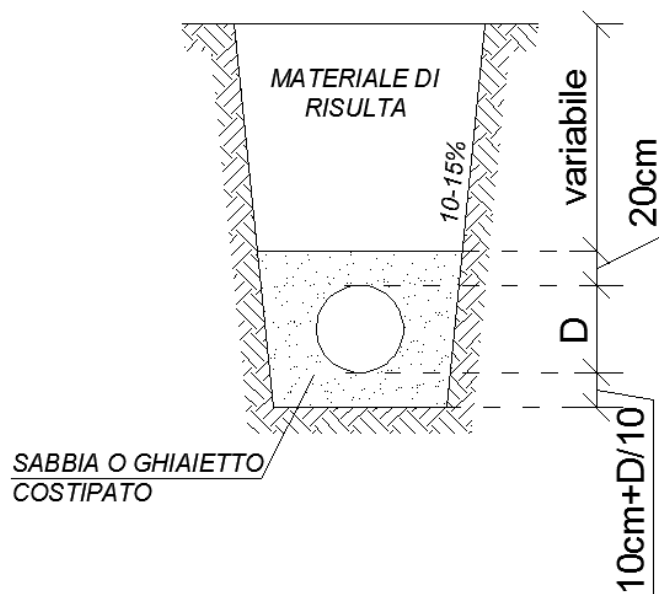
Per escludere ogni possibilità di contaminazione è obbligatorio porre il sistema fognario a quota inferiore rispetto alla rete di distribuzione, con profondità vincolate dalla necessità di fornire adeguate pendenze a ciascun tratto. Nel caso di sistemi separati, la fogna nera va

posizionata al di sotto di quella bianca per aumentare la sicurezza nei confronti della contaminazione, agevolare lo scarico dei piani interrati e consentire la derivazione delle portate di prima pioggia da convogliare al sistema depurativo.

La posa delle condotte avviene previo rilievo topografico per la localizzazione del tracciato; le tubazioni vengono alloggiare in *trincee continue* a pareti verticali (scavi in roccia) o subverticali, a seconda della tipologia di terreno interessato: per i terreni compatti bastano inclinazioni del 10 - 15%, mentre per terreni sciolti occorrono valori di gran lunga superiore o il sostegno dello scavo con adeguate *sbadacchiature* (scavo armato).

L'**altezza minima** dello scavo da realizzare si ottiene sommando alla profondità di posa essa il diametro esterno della condotta; nel caso in cui la posa avvenga in uno strato in roccia, è opportuno approfondire ulteriormente lo scavo in modo da disporre sul fondo un letto di sabbia che garantisca la continuità e l'uniformità dell'appoggio ed impedisca il danneggiamento della condotta o del suo rivestimento.

La **larghezza** della trincea deve consentire l'alloggiamento della condotta e del suo giunto e deve agevolare le operazioni di posa e rinfianco; in ogni caso la larghezza minima non può scendere al di sotto dei 60 - 70cm per permettere agli operai di muoversi liberamente e di spostarsi senza camminare sulle tubazioni.



Il ricoprimento deve essere effettuato con materiale selezionato e opportunamente compattato fino ad un'altezza di 20 cm al di sopra della generatrice superiore della condotta, mentre la restante porzione viene riempita con materiale di risulta degli scavi e, se necessario, ripristinando o realizzando gli strati di pavimentazione stradale previsti, avendo sempre cura di fornire un adeguato grado di costipamento.

Nel caso di diametri superiori al DN600 si preferisce realizzare sia il sottofondo che il primo riempimento in magrone di calcestruzzo, gettato nella trincea ed opportunamente vibrato, previo puntellamento interno delle tubazioni.

Oltre alla necessità del sostegno delle trincee in terreni sciolti, le maggiori problematiche connesse agli scavi sono rappresentate, come già richiamato, dall'eventuale interferenza con altri sottoservizi, dalla necessità di procedere alla stabilizzazione dei manufatti nell'area interessata (soprattutto nei centri storici) e nell'eventuale presenza di una falda freatica, da abbattere mediante l'utilizzo di stazioni di emungimento (*well points*).

Prova di tenuta idraulica (collaudo della condotta)

Prima di procedere al primo ricoprimento della condotta, una volta posizionate con opportuna cautela le tubazioni nella trincea per una lunghezza di qualche centinaio di metri (200 - 500m) si procede a giuntarle e si effettua una prima prova di tenuta idraulica.

Una volta assicurata la condotta con sbadacchiature in legno e martinetti idraulici di contrasto, si procede alla chiusura di una estremità con piatto metallico e al riempimento con acqua del tratto interessato mediante l'ausilio di una pompa fino al raggiungimento del valore di **pressione di collaudo**, fissata dal capitolato e comunque non inferiore alle prescrizioni normative (D.M. 12/12/85, "Norme tecniche relative alle tubazioni").

In particolare, la pressione di collaudo (p_C) deve risultare almeno pari a 1.5 volte la **pressione di esercizio** (p_E), definita come "*il massimo valore di pressione che può verificarsi in asse della tubazione per il più gravoso funzionamento idraulico del sistema, comprese le*

eventuali sovrappressioni Δ_P determinate da prevedibili condizioni di esercizio, anche se conseguenti a fenomeni transitori"; il limite inferiore della p_C è comunque rappresentato dal valore $p_E + 2\text{kgf}/\text{cm}^2$.

$$p_E = p_{\max} + \Delta_P \quad (1)$$

$$p_C = \max \begin{cases} 1.5 p_E \\ p_E + 2\text{kgf} / \text{cm}^2 \end{cases} \quad (2)$$

I valori della **massima sovrappressione** da colpo d'ariete (Δ_P) sono riportati in appendice alla sopra citata normativa nella tabella III, e variano a seconda della funzione della massima pressione idrostatica vigente.

Raggiunta la pressione di prova, si procede all'ispezione della condotta e dei giunti per riscontrare eventuali perdite macroscopiche, ma la prova risulta effettivamente superata se la pressione viene mantenuta per un certo numero di ore (fissato per capitolato, da un minimo di 6 ad un massimo di 24).

Se la prova ha buon esito, si procede al ricoprimento della condotta per almeno 50 - 60 cm ma lasciando scoperti i giunti, e si effettua una seconda prova di durata limitata (2 ore) al fine di scongiurare eventuali difetti di tenuta causati dal dislocamento dei giunti durante le operazioni di rinterrimento.

Riferimenti

G. Ippolito, *Appunti di Costruzioni Idrauliche*, Liguori Editore.

Decreto del Ministero dei Lavori Pubblici, 12 dicembre 1985. "Norme tecniche relative alle tubazioni".

VERIFICA STATICA DELLE CONDOTTE

La stabilità di una condotta interrata rispetto ai carichi esterni risulta fortemente condizionata dalle sue condizioni di posa, secondo un duplice aspetto:

- le sollecitazioni agenti sulla condotta;
- la risposta del materiale della condotta.

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

E' quindi possibile effettuare una distinzione tra cosiddetti tubi "*rigidi*" e tubi "*flessibili*", in funzione del tipo di risposta alla sollecitazione; tale classificazione viene effettuata sulla scorta della **rigidezza anulare** (SN) della tubazione:

$$SN = \frac{EI}{D_m^3} = \frac{E}{D_m^3} \cdot \frac{s^3}{12} = \frac{E}{12 \cdot \left(\frac{D_m}{s}\right)^3} \quad (3)$$

in cui:

D_m/s è il rapporto tra diametro medio e spessore del tubo

E è il modulo elastico a flessione della condotta (modulo di Young)

I è il momento di inerzia dell'area della parete del tubo in direzione longitudinale (per unità di lunghezza)

Il rapporto tra la rigidezza anulare ed il modulo elastico del terreno (E_g) fornisce il **coefficiente di elasticità in sito** (R):

$$R = \frac{SN}{E_g} \quad (4)$$

il cui valore permette di distinguere tra:

$$R \geq \frac{1}{12} \Rightarrow \text{Tubo RIGIDO}$$

$$R < \frac{1}{12} \Rightarrow \text{Tubo FLESSIBILE}$$

La rigidezza di una tubazione, dipende dunque dal confronto tra le caratteristiche del materiale e quelle del terreno; con riferimento ai materiali comunemente utilizzati per le condotte, a parità di terreno di posa, è tuttavia possibile classificare le tubazioni nel seguente modo:

- ❖ Tubazioni rigide:
 - calcestruzzo
 - gres
 - fibrocemento
- ❖ Tubazioni semirigide:
 - acciaio
 - ghisa
- ❖ Tubazioni flessibili:
 - PVC
 - PEAD
 - PRFV

Sotto l'azione dei carichi verticali, le tubazioni rigide non subiscono significative deformazioni sopportando la maggior parte del carico con un meccanismo di resistenza di tipo flessionale.

Le tubazioni flessibili, invece, nelle stesse condizioni si deformano nel piano laterale assumendo una configurazione trasversale grossolanamente ellittica, con asse minore verticale. Questo fenomeno, che prende il nome di **ovalizzazione**, innesca una deformazione del terreno circostante che a sua volta inizia a reagire, riducendo lo stato di sollecitazione della condotta e contribuendo a migliorarne la stabilità.

Carichi sulle tubazioni

Per quanto attiene al calcolo delle sollecitazioni agenti sulla condotta, occorre considerare la somma di 3 aliquote:

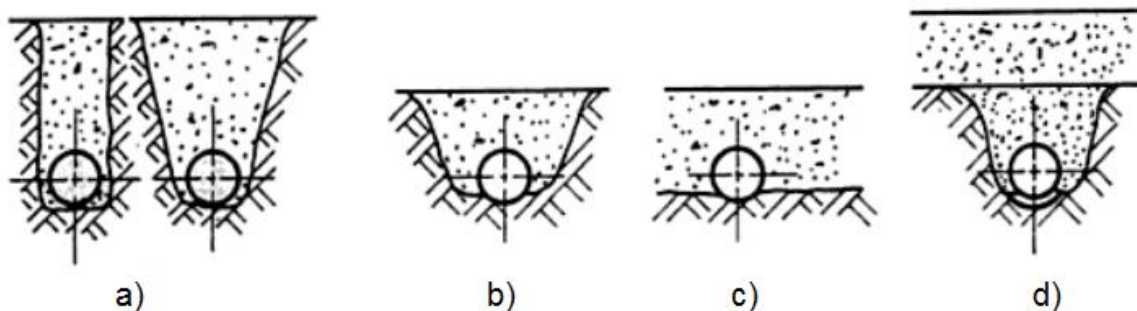
- carico del terreno di ricoprimento;
- carico mobile (traffico);
- carico dovuto alla presenza di falda.

In linea teorica andrebbe considerato anche il peso del fluido convogliato, ma la sua entità è trascurabile.

Carico del terreno

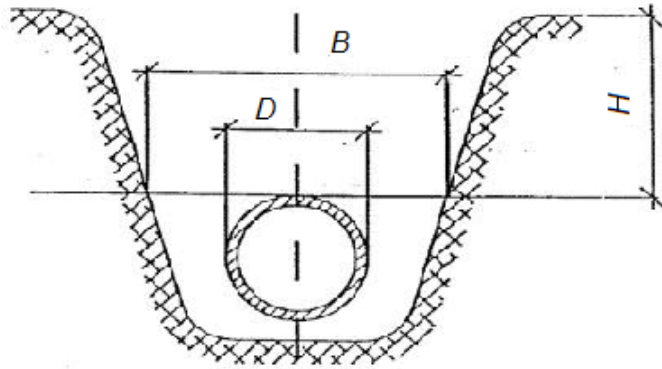
Come già richiamato in precedenza, le condizioni di posa influenzano anche la determinazione della sollecitazione agente: più in particolare, si distinguono quattro diverse condizioni di posa:

- posa in trincea stretta;
- posa in trincea larga
- posa in trincea con rinterro indefinito;
- posa in trincea stretta con rinterro indefinito.



La condizione più favorevole è rappresentata dalla **posa in trincea stretta**, che consente di trasmettere un'aliquota del carico sovrastante ai fianchi della trincea.

La definizione di trincea stretta è condizionata al rispetto dei seguenti limiti geometrici:



$$B \leq 2D \quad ; \quad H \geq 1.5B$$

$$2D < B < 3D \quad ; \quad H \geq 3.5B$$

In questa ipotesi, il carico dovuto al terreno di ricoprimento viene calcolato attraverso il **modello di Marston**:

$$q_t = C_d \cdot \gamma_t \cdot B \cdot D \quad (5)$$

$$C_d = \frac{1 - e^{-2 \cdot K \cdot \text{tg} \theta \cdot \frac{H}{B}}}{2 \cdot K \cdot \text{tg} \theta} \quad (6)$$

$$K = \text{tg}^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\varphi}{2} \right) \quad (7)$$

in cui:

- C_d è il coefficiente di carico di Marston per tubi in trincea stretta
- γ_t è il peso specifico del terreno
- θ è l'angolo di attrito tra materiale di riempimento e pareti della trincea
- K è il coefficiente di spinta passiva del terreno
- φ è l'angolo di attrito interno del riempimento

Materiale di riempimento	Angolo φ
Argilla plastica	11° - 12°
Terreno torboso	12°
Argilla normale	14°
Loess cretaceo	18°
Marna sabbiosa	20°
Marna bianca	22°
Marna molto compatta	24°
Marna verde	26°
Sabbia bagnata	30°
Sabbia fine non pressata	31°
Sabbia e ghiaia	33°
Ghiaia e ciotoli	37°
Ciotoli grossi	44°

Natura del terreno	Materiale del riempimento	Angolo θ
Marna	Sabbia	30°
Marna	Ghiaia	35°
Marna	Ciotoli grossi	40°
Rocce lisce	Sabbia	25°
Rocce lisce	Ghiaia	30°
Rocce schistose	Sabbia	35°
Rocce schistose	Ghiaia	40°

Carichi mobili

La valutazione delle sollecitazioni dovute ai sovraccarichi mobili si effettua considerando la tipologia di traffico veicolare con relazioni sperimentali del tipo:

$$q_m = P_v \cdot \varphi_m \cdot D \quad (8)$$

$$P_v = 43100 \cdot H^{-1.206} \text{ (convoglio HT45)} \quad (9)$$

$$P_v = 10700 \cdot H^{-1.518} \text{ (convoglio LT6)} \quad (10)$$

$$\varphi_m = 1 + 0.3 / H \text{ (mezzi stradali)} \quad (10)$$

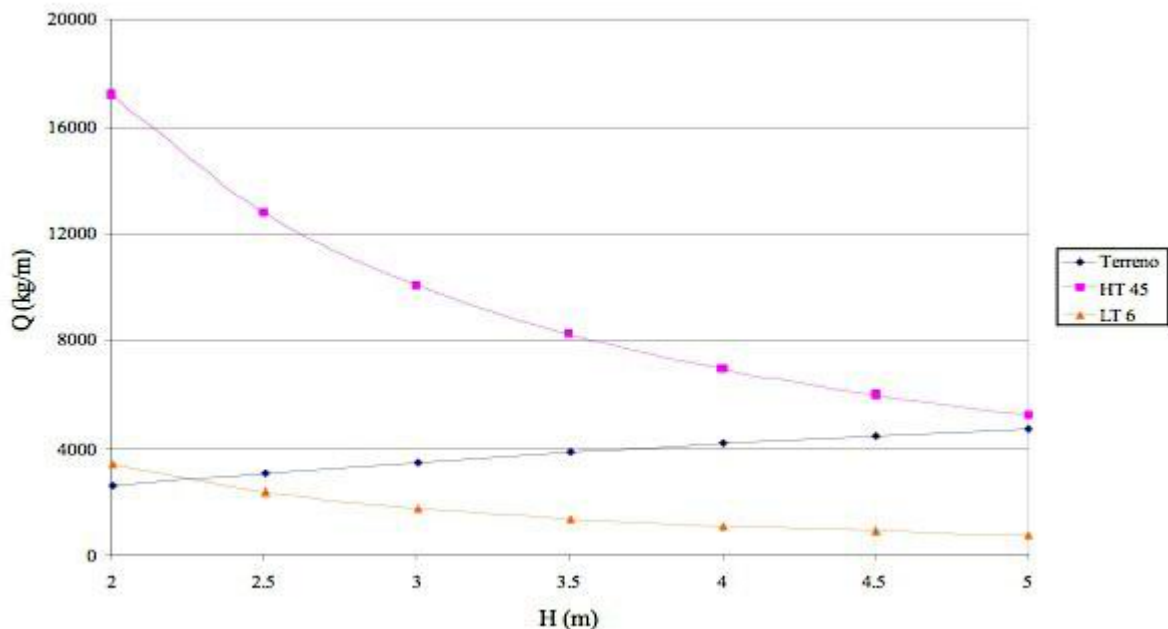
$$\varphi_m = 1 + 0.6 / H \text{ (mezzi ferroviari)}$$

in cui:

P_v è la pressione verticale sulla generatrice del tubo dovuta a sovraccarichi mobili concentrati

φ_m è il fattore dinamico

Dalla figura sottostante si evince come l'entità di questo sovraccarico si riduca all'aumentare della profondità di posa, al contrario di quanto accade per il carico del terreno.



Carico per la presenza di falda freatica

La pressione dovuta alla presenza di una falda presente nel terreno è data da:

$$q_f = \gamma_w \cdot (H - h) \cdot D \quad (11)$$

in cui:

γ_w è il peso specifico dell'acqua

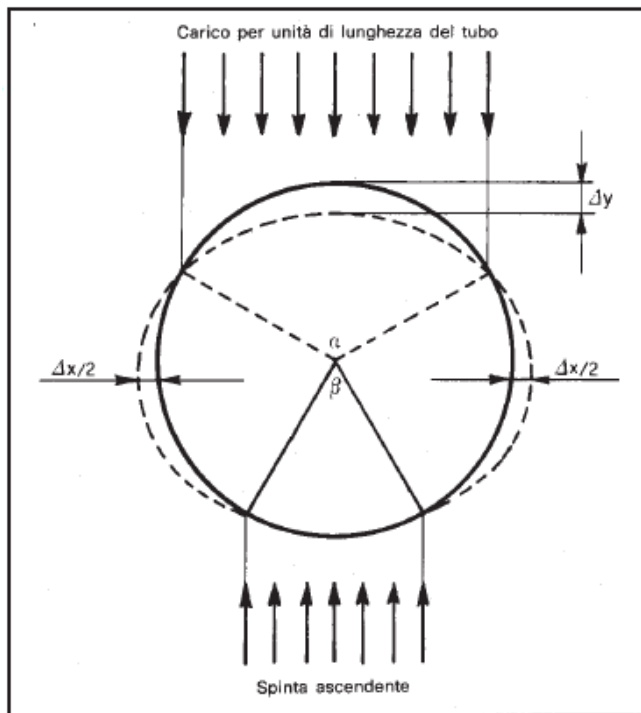
h è la profondità del tetto della falda

Verifica statica - Tubo flessibile

Come già richiamato in precedenza, nel caso di tubazione flessibile, occorre tener conto della reazione del terreno chiamata in causa dal fenomeno di ovalizzazione: in questo caso, dunque, la resistenza massima è limitata da uno *stato limite ultimo di deformazione* senza il raggiungimento di uno stato di fessurazione.

La verifica di stabilità consiste nell'accertare che la massima deformazione di ovalizzazione non superi un certo valore, fissato di norma pari al 5%. Tale deformazione è fornita dalla

formula di Spangler:



$$\Delta x = k_x \frac{QD^3}{8EI}$$
$$\Delta y = k_y \frac{QD^3}{8EI}$$

in cui:

k_x, k_y sono coefficienti dipendenti da α e β

Q è il carico verticale agente sulla tubazione (per unità di lunghezza)

D, E, I sono rispettivamente il diametro, il modulo elastico ed il momento di inerzia dell'area della parete del tubo in direzione longitudinale (per unità di lunghezza)

La formula si particularizza considerando $\alpha=\beta=180^\circ$ ed introducendo il modulo di elasticità del terreno (E_t) nella versione seguente:

$$\Delta x = \Delta y = \frac{0.083Q}{\frac{2}{3} \cdot E \cdot \left(\frac{s}{D}\right)^3 + 0.061E_t} \quad (12)$$

Il valore di E_t si ricava in funzione del fattore α' , dipendente dalla compattazione del rinfiacco del tubo collegato ai risultati della prova Proctor:

$$E_t = \frac{9 \cdot 10^4}{\alpha'} (H + 4) \quad [\text{kg/m}^2] \quad (13)$$

Prova Proctor	α'
95%	1,0
90%	1,5
85%	1,5 ²
80%	1,5 ³
75%	1,5 ⁴

La verifica risulta soddisfatta se: $\Delta x / D \leq 0.05$

La deformazione si incrementa all'aumentare del carico, mentre si riduce aumentando:

- il modulo elastico della condotta;
- il rapporto spessore/diametro;
- la profondità di posa;
- il grado di costipamento del rinfiacco.

Verifica statica - Tubo rigido

La risposta delle condotte rigide dipende solo dal comportamento della tubazione, per cui occorre analizzare lo *stato limite ultimo di rottura* trascurando, non essendo significativa, ogni verifica riguardante la deformazione.

In questo caso **la verifica risulta soddisfatta se risulta:**

$$\frac{KQ}{\mu} \geq Q_t \quad (14)$$

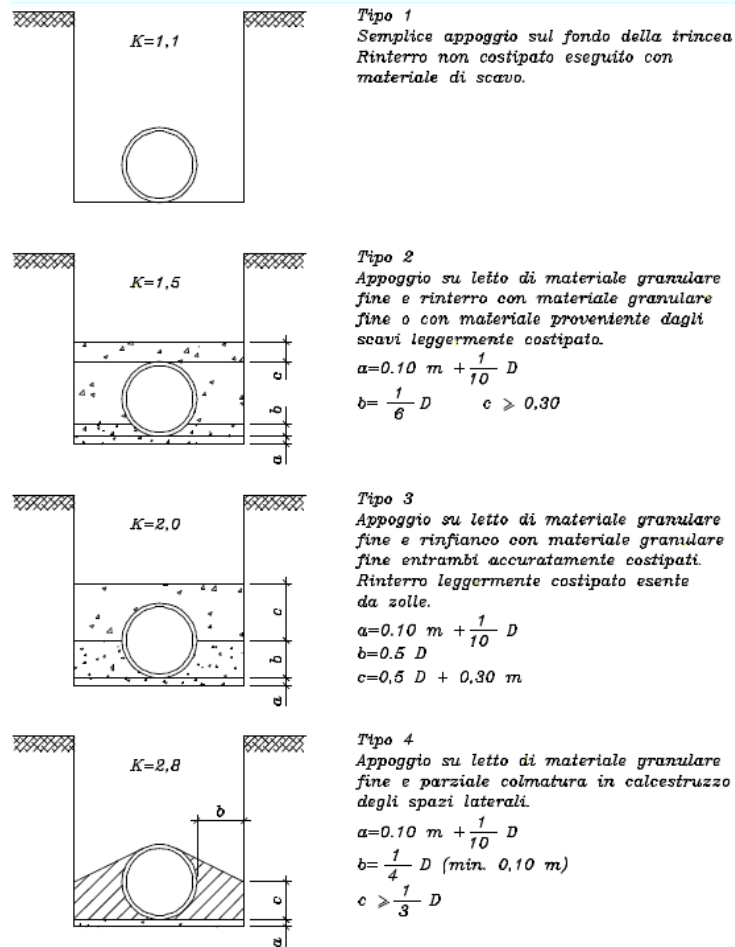
in cui:

K è un coefficiente di posa

Q è il carico verticale agente sulla tubazione (per unità di lunghezza)

Q_t è il carico di rottura per schiacciamento ottenuto mediante prove di laboratorio (da normativa)

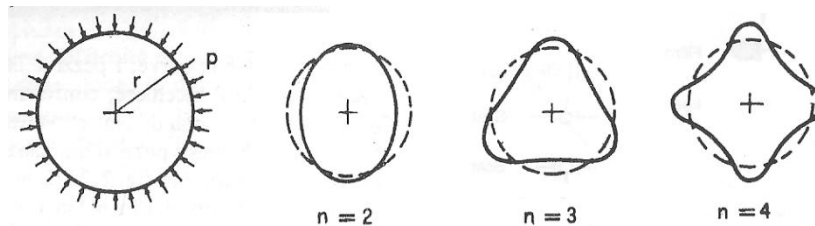
μ è un coefficiente di sicurezza allo schiacciamento (1.3 - 1.5)



L'aumento della stabilità si consegue adottando appoggi di materiale fine con gradi di costipamento crescente o abbracciando la condotta con letti stabiliti in calcestruzzo: la seconda soluzione risulta migliore e più duratura nel tempo anche in caso di successivi movimenti di terra (es. per altri sottoservizi), ma richiede costi e tempi di realizzazione certamente superiori.

Verifica dell'instabilità elastica (buckling)

In fase di esercizio una condotta può essere soggetta a condizioni tali che la pressione esterna risulti maggiore della pressione interna, ad esempio durante fenomeni transitori generati da manovre di regolazione di un impianto: in questi casi la tubazione dapprima rimane circolare e poi, all'aumentare delle forze, si inflette ovalizzando (deformata a due lobi) e progressivamente si ha deformazione a tre lobi, ecc.



Lo schiacciamento dell'anello di produce se, verificandosi una piccolissima deformazione di ovalizzazione del tubo, il lavoro della pressione esterna è maggiore del lavoro di deformazione elastica.

La valutazione delle condizioni limite per l'instabilità elastica viene condotta applicando la **formula di Allievi - Timoshenko**, che per condotte circolari in pressione si particolarizza nella seguente:

$$\frac{R}{s} < \sqrt[3]{\frac{E}{4 \cdot \Delta P}} \quad (15)$$

in cui:

R, s, E sono rispettivamente il raggio, lo spessore ed il modulo di Young della condotta
 ΔP è la massima depressione ricavabile, a vantaggio di sicurezza, considerando nulla la pressione interna