

TUBAZIONI IN POLIETILENE HORIZONTAL DIRECTIONAL DRILLING

La perforazione orizzontale guidata è una tecnica di posa delle tubazioni sempre più utilizzata ed ormai di uso comune nell'installazione delle condotte in polietilene. Il numero sempre crescente di questo tipo di installazioni è legato ai benefici che offre per gli enti di gestione delle acque in particolare grazie all'eliminazione dei disagi alla circolazione ed il minimo intervento sulla superficie del terreno. In molti casi il massimo sforzo a cui sarà soggetta la tubazione si ottiene durante la fase di tiro nel cavo.

L'installazione con tecnologia per perforazione orizzontale richiede una scelta accurata del tipo di tubazione che tenga in considerazione la massima forza di tiro, la resistenza al collasso, ma anche le caratteristiche di resistenza del tubo a lungo termine e la capacità del materiale di resistere alle sollecitazioni puntuali.

La tecnica prevede l'esecuzione di un foro pilota al di sotto dell'ostacolo da superare, mediante una stringa continua di aste perforanti in acciaio. Al raggiungimento dell'uscita del foro la stringa si muove all'indietro agganciata ad un alesatore che allarga il foro pilota per consentire l'inserzione del tubo. Una considerazione chiave nell'esecuzione del foro pilota riguarda il raggio di curvatura della condotta che deve essere più grande possibile, questo perché le curve inducono tensioni sulla condotta ed aumentano lo sforzo di tiro. Alte tensioni di trazione riducono la resistenza al collasso del tubo. Il progettista dovrebbe minimizzare il numero di curve e massimizzare il raggio di curvatura delle stesse lavorando sulla migliore posizione tra ingresso e uscita della perforazione. Il passaggio dell'alesatore nel foro pilota serve per creare un foro sovra dimensionato rispetto al diametro esterno del tubo di circa il 120 – 150% del diametro della tubazione. Mentre il sovradimensionamento del foro è necessario per il corretto inserimento del tubo, il vuoto che si crea tra tubo e terreno riduce la capacità del tubo di resistere ai carichi verticali. Prima del tiro del tubo, un alesatore pulisce il foro dal pietrisco e da spuntoni argillosi e compatta le pareti dello scavo.

Solitamente si utilizza un fango di perforazione come l'argilla bentonitica fluida, iniettata nel foro durante la trivellazione per stabilizzarlo e rimuovere i detriti. Il fango può essere costituito di argilla o polimeri miscelati con acqua. Il fango riduce lo sforzo di perforazione e fornisce stabilità e supporto al foro.

Il tiro del tubo può avvenire per tutto il tratto da posare in un unico segmento. Occorre prestare attenzione affinché la movimentazione, la minimizzazione delle curvature, i controlli visivi della superficie del tubo e le procedure per la saldatura siano correttamente seguite. E' bene registrare la forza di trazione assiale e la lunghezza inserita, mantenere una velocità di inserzione quanto più costante possibile (intorno a 0,3 – 0,6 m/min) e garantire la costante circolazione del fango bentonitico.

Linee guida generali

1. Selezionare il tratto di perforazione perché sia, ragionevolmente, il più breve possibile.
2. Cercare un percorso ed un sito dove la tubazione possa essere costruita in tratti della maggiore lunghezza possibile, considerando di saldare i segmenti durante l'inserzione.
3. Cercare di mantenere il percorso più dritto possibile.
4. Evitare che il dislivello tra il foro di ingresso e di uscita sia superiore a circa 15 metri; entrambi i punti dovrebbero essere quanto più possibile alla stessa quota.

5. Posizionare tutte le strutture interrato ed i servizi entro tre metri dal percorso trivellato per piccoli interventi ed entro 8 metri per interventi di maggiore importanza. Solitamente si studiano le curve di livello per l'esatta localizzazione.
6. Valutare ed evitare la vicinanza a strutture fuori terra, come linee elettriche, che potrebbero limitare l'altezza delle componenti verticali delle apparecchiature di trivellazione.
7. Il sistema per trivellazione orizzontale limita molto l'esigenza di spazio di cantiere, comunque l'esigenza di spazio di manovra e lavoro varia in funzione della distanza da coprire, del diametro del tubo e della tipologia di terreno.
8. Attraversamenti molto lunghi con diametri importanti necessitano apparecchiature e perforatrici più potenti.
9. Con l'aumentare del diametro, dovranno essere pompate grossi volumi di fanghi di perforazione, questo richiederà pompe più grandi o in maggior numero, il trattamento del fango ed attrezzature per lo stoccaggio.
10. Lo spazio necessario per grandi trivellazioni può variare tra 30 metri di larghezza per 45 metri di lunghezza per perforazioni lunghe circa 300 metri e tra 60 metri di larghezza e 90 metri di lunghezza per perforazioni lunghe fino a circa 900 metri.
11. Occorre prevedere uno spazio sufficiente per consentire le operazioni di saldatura tra le barre di polietilene ed il temporaneo stoccaggio e movimentazione delle stringhe. Lo spazio richiesto per tubi in rotoli sarà considerevolmente inferiore.

Studio geotecnico

Prima di procedere con la progettazione e l'installazione occorre uno studio geotecnico approfondito per identificare le formazioni del terreno del sito da trivellare. L'indagine geotecnica punta a verificare la fattibilità e ad identificare il percorso più adatto e la tecnologia di scavo economicamente più vantaggiosa. Con queste informazioni può essere determinato il migliore percorso, l'apparecchiatura di perforazione e il dimensionamento della tubazione. L'approfondimento geotecnico dipende dal diametro del tubo, dalla lunghezza del foro e dalla natura e destinazione della zona da oltrepassare.

L'indagine geologica dovrà evidenziare tra l'altro:

- a. Identificazione dei suoli per verificare la presenza di roccia, o inclusioni rocciose, suoli ghiaiosi, depositi sciolti, discontinuità e strati difficili da perforare.
- b. Resistenza del suolo e caratteristiche di stabilità
- c. Presenza di acque di falda

Per lunghi attraversamenti, i sondaggi si eseguono normalmente con passi di 200 metri, per brevi attraversamenti (inferiori a 300 metri), tre sondaggi possono normalmente ritenersi sufficienti. I sondaggi dovrebbero essere fatti vicino al percorso da trivellare, per avere un'accurata mappatura dei suoli, ma sufficientemente distanti dal tunnel per evitare la risalita del fango in pressione attraverso le fessure e fino in superficie attraverso il foro del carotaggio. Una indicazione sommaria può essere di eseguire i carotaggi ad una distanza dell'ordine di 10 metri dai bordi del percorso trivellato. Sebbene le indicazioni fornite siano

di carattere generale, il numero, la profondità e la localizzazione dei carotaggi dovrebbe essere determinata da un ingegnere geotecnico. L'attraversamento di aree fluviali, richiede informazioni aggiuntive, riguardo al letto del fiume: profondità, stabilità delle sponde e profondità. Solitamente i tubi vengono installati ad una profondità di almeno 6 metri sotto il piano di scorrimento del fiume previsto considerando l'erosione. I carotaggi vengono generalmente condotti fino a 12 metri al di sotto del fondo del fiume.

Progettazione della tubazione: scelta del SDR

I requisiti idraulici della linea, intesi come capacità di portata, pressione di esercizio e resistenza alle sovrappressioni o depressioni. Queste considerazioni devono essere svolte indipendentemente dal sistema di installazione. Oltre alle considerazioni idrauliche, il tubo dovrebbe essere in grado di resistere al carico di tiro, alla pressione idrostatica esterna, alla tensione di curvatura ed ai carichi esterni di servizio (carico del suolo dopo installazione, acque di falda, e sovraccarichi che potrebbero instaurarsi durante la vita utile della condotta).

Solitamente le azioni combinate della forza di tiro e della pressione esterna sono le più gravose a cui è sottoposto il tubo nell'arco della sua vita di servizio. Di seguito verranno indicate alcune considerazioni relative al dimensionamento della condotta considerando gli sforzi di tiro ed i carichi esterni.

La scelta del SDR più appropriato viene fatta per soddisfare le tre richieste, pressione, carichi di servizio e carico di tiro.

Carichi esterni

Un importante fattore nella determinazione del carico esterno a cui sarà sottoposto il tubo riguarda la stabilità della perforazione, il foro può rimanere circolare o collassare. Questo dipenderà dalla tipologia di suolo, dalla tecnica di perforazione e dalla presenza di fango (bentonitico e residuo dalla perforazione). Se il foro non subisce deformazioni dopo la perforazione, i carichi si distribuiscono ad arco attorno al foro e solo una piccola pressione è trasmessa al tubo. L'azione della pressione sul tubo è di natura idrostatica dovuta al fango o all'acqua di falda presente. L'azione del fango agevola il mantenimento del foro aperto. Se il foro collassa o si deforma, una pressione esterna sarà applicata sulla tubazione. Se non si instaura l'effetto arco sul foro, la pressione esterna applicata sarà uguale a quella combinata di terreno, acque di falda e sovraccarichi di esercizio. L'attraversamento di suoli non consolidati (ad esempio sotto il letto di un fiume) il collasso del foro genera comunque un effetto arco sul tubo minimo, la pressione applicata sul tubo sarà dunque quella geostatica (carico del prisma di terreno). In suoli consolidati, l'effetto arco può instaurarsi sopra il tunnel pertanto la pressione sul tubo sarà inferiore a quella geostatica, a meno di totale collasso del foro sulla tubazione. Se il terreno fosse argilla compatta cementata o parzialmente litificata il foro resterà circolare con minime deformazioni. In questo caso, la pressione applicata sarà data solo dal carico del fango o dalla pressione idrostatica dell'acqua di falda. In aggiunta all'effetto della pressione esterna dovuta al carico di fango ed all'acqua di falda, una eventuale depressione interna del tubo aumenta la risultante delle pressioni esterne, d'altro canto una pressione interna positiva può mediare la spinta esterna. L'equazione di seguito riportata può essere utilizzata per definire la pressione esterna o la pressione differenziale tra l'interno e l'esterno della condotta.

In funzione delle condizioni del foro, la pressione agente dall'esterno è definita dalle equazioni:

$$P_N = P_E + P_{GW} + P_{SUR} - P_I \text{ (in caso di deformazione o collasso del foro)}$$

$$P_N = P_{MUD} - P_I \text{ (in caso di foro aperto)}$$

Dove:

P_N : pressione esterna netta

P_E : pressione esterna dovuta al carico di terreno

P_{GW} : pressione di falda (compresa l'altezza d'acqua del fiume)

P_{SUR} : sovraccarico e carichi dinamici

P_I : pressione interna, negativa in caso di depressione

P_{MUD} : pressione idrostatica del fango di perforazione, delle acque sotterranee o indotte dal fango

$$P_{MUD} = g_{MUD} \cdot H_B$$

Dove:

g_{MUD} : peso specifico del fango

H_B : differenza di quota tra il punto più basso della perforazione ed il foro di ingresso o uscita.

Nel calcolo della pressione esterna, si dovrà tenere conto dei carichi applicati nel tempo e la loro durata. Infatti molte condotte lavorano secondo processi che includono, lo scarico della pressione interna ed il drenaggio, la pressione operativa, il riempimento, il collaudo, l'arresto del flusso, eventuale rischio di vuoto o sovra-pressioni transitorie. Il progettista dovrà considerare le varie fasi del ciclo di vita della condotta.

Inoltre occorre considerare il comportamento viscoelastico del polietilene nella determinazione dei carichi, poiché il materiale reagisce ai carichi in funzione del tempo di applicazione del carico stesso. Per esempio il tubo resiste al carico delle acque sotterranee e del terreno secondo la sua rigidità a lungo termine, mentre resiste a sovra-pressioni o depressioni istantanee di colpo d'ariete secondo la sua rigidità a breve termine che può essere quattro volte più alta di quella a lungo termine. Lo stesso effetto si verifica per la resistenza a trazione, che decresce con il tempo di tiro, quindi lo sforzo massimo di tiro diventa funzione del tempo. I valori tipici di modulo elastico e resistenza a trazione sono dati nella tabella:

Modulo di elasticità apparente minimo (MPa)			Sforzo massimo di trazione in sicurezza (MPa)		
Durata	PE100	PE80	Durata	PE100	PE80
Breve termine	800	600	30 min	9,0	6,9
10 ore	400	300	60 min	8,3	6,0
100 ore	300	250	12 ore	7,9	5,9
50 anni	200	150	24 ore	7,6	5,5

Deflessione massima suggerita (y/D %)							
SDR	21	17	15.5	13.5	11	9	7.3
Tubi a gravità	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5	7,5
Tubi pressione	7,5	6,0	6,0	6,0	5,0	4,0	3,0

Percorsi in curva producono uno sforzo ed una ovalizzazione sul tubo. Tale sforzo si somma al carico di pressione interna del fluido trasportato, questa combinazione produce concentrazioni di sforzo localizzata nelle fibre esterne del tubo. Comunque l'effetto della pressione interna tende ad arrotondare il tubo ed a ridurre lo sforzo di curvatura. Comunque si tende a considerare per i tubi a pressione la stessa ovalizzazione massima considerata per i tubi a gravità.

La pressione esterna uniforme applicata al tubo dal terreno e dai carichi statici e dinamici in superficie, dalle acque di falda e dai fanghi di perforazione genera uno sforzo di compressione nella parete del tubo. Se la pressione esterna supera il valore critico, si verifica una improvvisa deformazione del tubo, collasso. Vincolando il tubo con il rinfiacco, o con riempimenti cementizi aumenta la resistenza del tubo al collasso e consente al tubo di raggiungere maggiori pressioni esterne. Qualora non fosse noto il grado di supporto al tubo dato dalla miscela di fanghi e residui di perforazione è cautelativo considerare il tubo come non vincolato.

Pressione critica di collasso per tubi non vincolati a 23°C (MPa)							
Vita di servizio del tubo	SDR						
	7,4	9	11	13,6	15,5	17	21
Breve termine	6,9	3,3	1,7	0,8	0,5	0,4	0,2
100 ore	3,3	1,6	0,8	0,4	0,27	0,2	0,1
50 anni	1,9	0,9	0,5	0,25	0,16	0,1	0,06

Quando la pressione nel tubo supera la pressione esterna, lo sforzo a cui è soggetto il tubo passa da compressione a tensione ed il collasso non avviene.

La temperatura del tubo è un parametro importante nella definizione della pressione critica di collasso di seguito si evidenziano i fattori di riduzione della pressione critica all'aumentare della temperatura.

Temperatura	16° C	23° C	38° C	49° C
Fattore di riduzione	1,08	1,00	0,78	0,63

Forza di tiro

Durante il tiro nel cavo il tubo è soggetto ad una forza di trazione assiale dovuta all'attrito tra il tubo e il cavo o il fango di trivellazione, l'attrito sulla superficie del terreno, l'effetto argano lungo le curve del percorso trivellato e la resistenza idrocinetica. Inoltre, il tubo può essere soggetto a pressione dovuta al carico di fluidi esterni e lo sforzo di curvatura. La resistenza alla pressione al collasso deve essere ridotta in

considerazione della forza di trazione. Inoltre le curve del percorso trivellato dovrebbero essere limitate al raggio di curvatura del tubo. Non si considerano forze di torsione poiché si considera correttamente progettato l'alesatore del foro. Le considerazioni fatte si riferiscono ad una trivellazione ottimale che ottenga un cavo rigido, con curvature gradualmente, un buon allineamento, nessun collasso del tunnel, una buona rimozione degli sfridi di perforazione ed una buona circolazione dei fanghi.

A causa del grande numero di variabili coinvolte, quanto presentato risulta essere solo una linea guida per approssimare questo tipo di installazione. Il progettista avrà il compito di contestualizzare, considerando le caratteristiche dell'applicazione, del sito e della tecnologia di trivellazione disponibile.

La maggior parte della forza di trazione si concentra all'interfaccia tra tubo e l'alesatore che lo precede nel cavo. L'intensità dello sforzo assiale aumenta con l'aumentare della lunghezza tirata. La durata dello sforzo è maggiore in prossimità della testa di tiro. La parte terminale del tubo non è soggetta a forze di tensione. Lo spessore della tubazione deve essere scelto in modo che la forza di tiro, non superi lo sforzo di trazione massimo ammissibile per il tubo. Aumentando lo spessore aumenta anche il peso del tubo, ma la forza di tiro entro il cavo non risente direttamente dell'aumento di peso. Quindi maggiori spessori di tubo, riducono, in generale, lo sforzo.

La resistenza di tiro dipende fondamentalmente dalla forza di attrito tra il tubo e il tunnel o la superficie del terreno nella zona di ingresso, la forza di attrito tra il tubo ed i fanghi di perforazione, l'effetto argano nelle curve ed il peso del tubo. Di seguito si propone una relazione per la definizione della forza di tiro per un tubo trainato in un cavo piano o su una superficie piana.

$$F_p = m \cdot W_B \cdot L$$

Dove:

F_p : forza di tiro

m : coefficiente di attrito tra tubo e fanghi (solitamente 0,25) o tra tubo e terreno (solitamente 0,40)

Quando è presente un fluido nello scavo, W_B rappresenta la forza di galleggiamento del tubo e del suo contenuto, L è la lunghezza di tiro ed m è il coefficiente di frizione del terreno o delle pareti del cavo. Riempiendo il tubo di liquido si ottiene una riduzione significativa della forza di galleggiamento dunque della forza di tiro. Il tubo di polietilene ha una densità vicina a quella dell'acqua. Se il tubo è installato vuoto, utilizzando una testa di tiro chiusa, il tubo cercherà di galleggiare fino a toccare l'estradosso del foro, la forza di frizione che si genera coinvolge la spinta di galleggiamento del tubo ed il coefficiente di attrito tra tubo e suolo umido. La maggior parte delle installazioni viene fatta riempiendo di acqua il tubo nel momento in cui discende all'interno del cavo. L'acqua viene introdotta nel tubo attraverso la testa di tiro o con un piccolo tubo inserito all'interno. Occorre tenere presente che con la tubazione vuota il galleggiamento provoca il contatto e la frizione del tubo sulla parete superiore del cavo, questo può comprimere il tubo ed allontanare il fluido lubrificante a contatto con la parete del foro; in caso di fermo del tiro, questo effetto induce un aumento dello sforzo alla partenza della successiva sessione di traino.

Nei tratti in curva del foro, la forza viene scomposta in componente verticale ed orizzontale. Quando il tubo viene tirato in curva si crea un angolo q (radianti), con una scomposizione delle forze in base alla direzione dei vettori delle forze. La forza di tiro dovuta all'effetto argano è data dall'equazione:

$$F_C = e^{mq} \cdot (m \cdot W_B \cdot L)$$

Le due equazioni date vanno calcolate in maniera ricorsiva per ciascuna sezione lungo la distanza di tiro.

Durante il tiro, il movimento del tubo è contrastato dalla forza di trascinamento dei fanghi di drenaggio fluidi. Questa forza idrocinetica è di difficile stima e dipende dalla tipologia di miscela di fanghi utilizzata, dalla portata dei fanghi, dalla velocità di tiro, dalle dimensioni del cunicolo e del tubo. Tipicamente il contributo della pressione idrocinetica p è stimato tra i 30 ed i 60 kPa.

$$F_{HK} = p \cdot \frac{\pi}{8} \cdot (D_H^2 - OD^2)$$

Dove: F_{HK} : forza idrocinetica;

p : pressione idrocinetica;

D_H : diametro del foro

OD : diametro esterno del tubo.

Resistenza a trazione durante il tiro

Il massimo sforzo di trazione sulle fibre del tubo non dovrebbe superare la resistenza massima a trazione del tubo secondo un fattore di sicurezza impostato. Il massimo sforzo di trazione è ottenuto considerando la somma delle tensioni date dalla forza di tiro, dalla componente idrocinetica e dalla tensione di trazione dovuta alle curvature. Durante il tiro si suggerisce di controllare la forza di trazione per evitare eccessivi sforzi al tubo.

Lo sforzo di trazione che si sviluppa sulle pareti del tubo durante il tiro sarà:

$$s_t = \frac{F_T}{\pi(D_{OD} - t)} + \frac{E_T D_{OD}}{2R}$$

Dove: s_t : è la tensione assiale

F_T : la forza di trazione totale

t : lo spessore di parete minimo

D_{OD} : è il diametro esterno del tubo

E_T : è il modulo elastico definito per la durata del carico

R : è il raggio di curvatura minimo nel percorso trivellato

Lo sforzo assiale dovuto alla forza di tiro non deve superare il carico massimo di trazione secondo un opportuno fattore di sicurezza, giustificato per la durata dell'applicazione del carico. Durante le operazioni di tiro, la forza non viene applicata continuamente al tubo, perché la trivella deve fermarsi per consentire l'estrazione delle aste. Il tubo, pertanto non viene sottoposto ad una forza di trazione costante e può

rilassarsi tra una sessione di tiro e la successiva. Il valore di modulo elastico può essere valutato ad un'ora di applicazione dello sforzo, comunque il valore di modulo elastico per un carico di 12 ore minimizza il rischio di sollecitare eccessivamente il tubo. Al termine delle operazioni lo scarico delle tensioni provocherà l'accorciamento della linea tirata, pertanto si consiglia di mantenere il tubo di circa il 3% della lunghezza trainata superiore rispetto all'uscita del cavo.

La forza di trazione durante il tiro aumenta la deformazione circonferenziale e riduce la resistenza al collasso, occorre considerare questo fattore nella definizione della massima pressione esterna:

$$F_R = \sqrt{(5,57 - (r + 1,09)^2)} - 1,09 \quad \text{Dove: } r = \frac{s_T}{2s}$$

s_T : sforzo di trazione calcolato durante il tiro

s : sforzo di trazione di sicurezza

Quanto contenuto nel presente estratto è stato tratto e tradotto dal testo: "Handbook of polyethylene pipe" Edizione due; Plastic Pipe Institute.