



La tecnologia TOC per tubazioni in polietilene

LE TRIVELLAZIONI ORIZZONTALI CONTROLLATE HANNO AVUTO UNA CRESCITA IMPORTANTISSIMA NEGLI ULTIMI VENT'ANNI TANTO DA ESSERE ORMAI CONSIDERATE DI ORDINARIA APPLICAZIONE NELL'INSTALLAZIONE DI TUBAZIONI DI DIVERSO TIPO E PER SVARIATI USI CIVILI E INDUSTRIALI

Massimo Chiarelli*

La tecnologia TOC offre molti vantaggi d'installazione. La posa di una tubazione in Polietilene richiede un'accurata progettazione allo scopo di determinare i limiti della forza di tiro e resistenza al collasso valutando inoltre, le prestazioni a lungo termine.

Le tubazioni installate adottando il procedimento TOC servono principalmente al trasporto di petrolio greggio, metano, prodotti petrolchimici, acqua, scarichi. Spesso vengono posati anche tubi di protezione per la posa di cavi elettrici o fibre ottiche.

Rappresentano importanti campi d'applicazione i passaggi sotto:

- ◆ fiumi, laghi, estuari, paludi, ecc.;
- ◆ strade, ferrovie, piste aeroportuali;
- ◆ biotopi;
- ◆ zone inaccessibili;
- ◆ superfici degne di protezione.

Adottando la tecnica TOC sono state raggiunte ad oggi lunghezze di trivellazione pari a 1.800÷2.000 m e installati tubi in acciaio con un diametro fino a 56" (DN 1400). Entrambi i dati sono valori estremi e non andrebbero considerati in combinazione come standard tecnico.

Rispetto ai metodi convenzionali, la tecnologia TOC presenta una serie di vantaggi:

- ◆ influsso minimo della costruzione sull'ambiente;
- ◆ attività di scavo ridotte al minimo;
- ◆ nessun pregiudizio al traffico navale, ferroviario, aereo o automobilistico;
- ◆ lavori di sterro/movimentazione di terreno ridotti;
- ◆ possibilità di effettuare grandi coperture di terra sulla tubazione;
- ◆ è possibile osservare una grande distanza dall'ostacolo da incrociare;
- ◆ è assicurata la protezione della tubazione da getti d'ancora (lavori offshore) o da lavori con escavatrici;
- ◆ non risulta di solito necessaria alcuna protezione da sottopressione della tubazione;



1. Una macchina Rig pronta per l'esecuzione del foro pilota

- ◆ nessun pericolo di "sciacquo" della tubazione a seguito di erosione delle acque;
- ◆ ridotti tempi di costruzione;
- ◆ influsso contenuto dalle condizioni meteorologiche e dai livelli d'acqua.

In molti casi la tecnologia TOC risulta essere meno costosa dei procedimenti costruttivi alternativi.

Le fasi di realizzazione

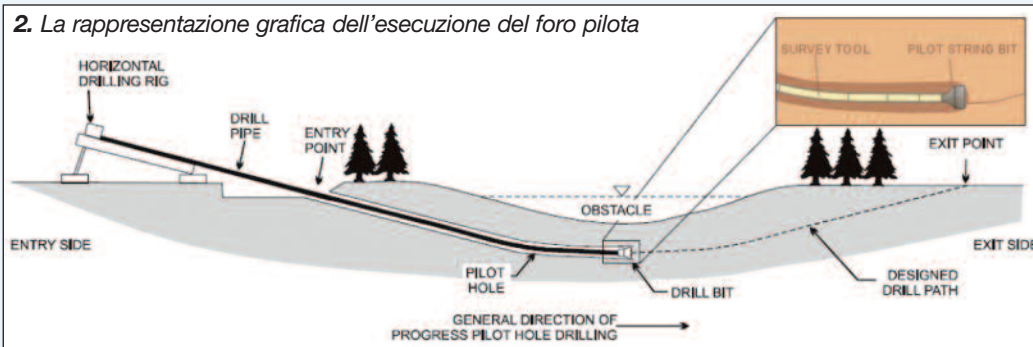
Nell'ambito dell'esecuzione delle TOC si distinguono essenzialmente tre fasi:

- ◆ esecuzione del foro pilota (Pilot borehole);
- ◆ trivellazione/i d'allargamento del preforo (Back-Reaming);
- ◆ tiro-posa della condotta (Pull-Back).

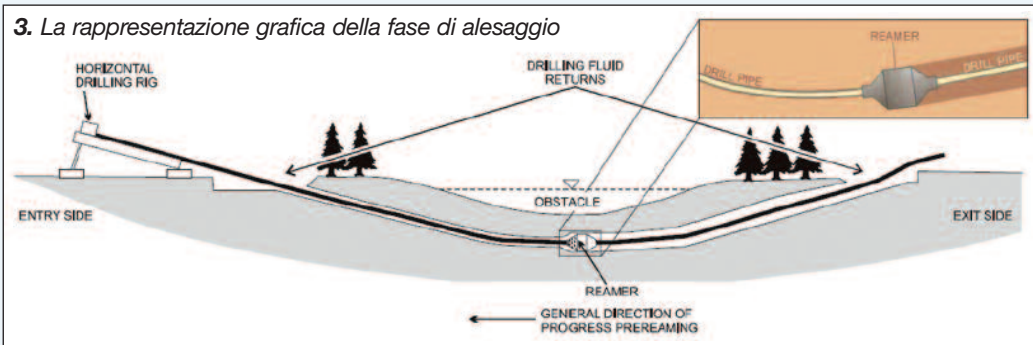
Queste operazioni rispecchiano il modo di lavoro standard, ma possono essere soggette a variazioni in funzione del procedimento seguito e dei requisiti del progetto specifico. Risulta fondamentale la redazione di una descrizione operativa adattata alle specifiche condizioni marginali, comunemente chiamato "Progetto di cantierizzazione della TOC".



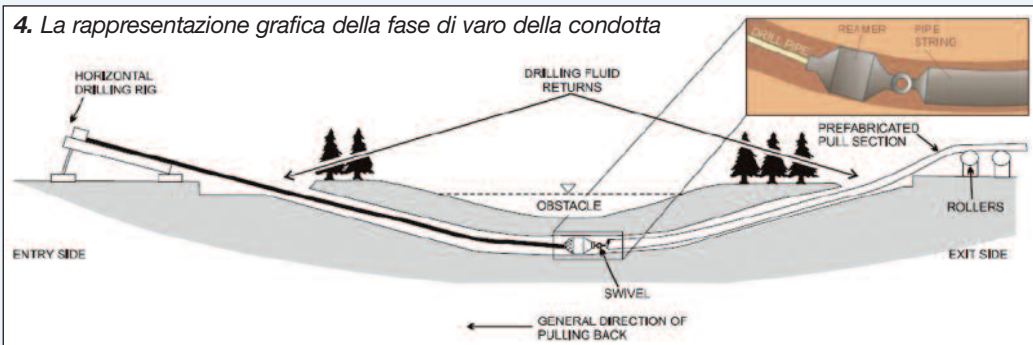
2. La rappresentazione grafica dell'esecuzione del foro pilota



3. La rappresentazione grafica della fase di alesaggio



4. La rappresentazione grafica della fase di varo della condotta



La posa di condotte in polietilene o acciaio, può essere effettuata a “secco” oppure ad “umido”. Si dice avanzamento ad “umido” quando si ricorre ad un getto di fluido costituito da acqua e bentonite (slurry) per allentare il terreno durante la trivellazione ovvero, rimuovere il cutting di perforazione verso l'esterno mediante la circolazione del fluido nel foro. Per la posa di tubazioni di piccolo diametro, la fase di alesatura può essere omessa impiegando macchine più piccole e riducendo i tempi d'esecuzione, le aree di cantiere e i costi in generale.

Lo studio dei terreni attraversati

Condurre un attento studio geologico-geotecnico al fine d'identificare le caratteristiche del suolo in cui sarà eseguito il foro per l'installazione della tubazione, è di fondamentale importanza. Lo scopo è quello di stabilire se la TOC sia fattibile e, nel caso affermativo, come sia possibile realizzarla nel modo più efficiente possibile.

Sarà fondamentale stabilire il miglior percorso di trivellazione nonché la tipologia di utensili da usare. Da ciò dipende altresì, la scelta delle caratteristiche della tubazione.

L'entità dell'indagine spesso è funzione del diametro del tubo, dalla lunghezza della trivellazione e dalla natura dei terreni attraversati.

Sono generalmente individuati i seguenti elementi:

- ◆ identificazione del suolo (roccia, terreni ghiaiosi, depositi sciolti, discontinuità);
- ◆ presenza di acque sotterranee e/o di superficie;
- ◆ caratteristiche di stabilità e resistenza.

Indicativamente, per attraversamenti molto lunghi, i sondaggi nel terreno vengono eseguiti a intervalli di circa 200 m l'uno dall'altro mentre, per attraversamenti brevi (circa 300 m), ne sono sufficienti tre. I sondaggi devono essere eseguiti vicini alla linea futura di trivellazione, ma sufficientemente lontani dal futuro foro al fine di impedire, nel caso si intenda eseguire una trivellazione in “umido”, la risalita in superficie dei fanghi bentonitici iniettati attraverso l'asta di perforazione.

Nel caso di attraversamenti fluviali occorre acquisire ulteriori informazioni come, ad esempio, l'identificazione del letto del fiume, la larghezza, la stabilità degli argini, il regime, ecc.

Una volta che l'indagine è conclusa, può stabilirsi se la TOC sia fattibile o meno.

La progettazione della tubazione in PE

Completate le indagini sul suolo e stabilito che la TOC è fattibile, l'attenzione si sposta alla selezione della tubazione in PE da installare. Essa dovrà soddisfare tutti i requisiti idraulici in funzione del tipo di fluido che l'attraverserà rapportando il tutto anche al metodo d'installazione. Ci si riferisce alla forza di trazione indotta su di essa nella fase di pull-back, eventuali sollecitazioni del terreno nel cavo, la pressione dell'acqua di falda e i sovraccarichi che si possono verificare durante la vita della condotta. Spesso la tubazione vede il suo massimo carico in termini di forze cui è soggetta proprio durante la sua installazione con la combinazione della forza di tiro e delle pressioni esterne.

Le tubazioni in PE sono classificate per diametro e spessore delle pareti. Ne esistono in commercio molti tipi in funzione dell'utilizzo e del fluido trasportato. Si inizia con lo stabilire le caratteristiche dalla pressione interna del fluido trasportato e se sia capace di resistere alla pressione del terreno, alla pressio-



ne dell'acqua di falda e alle forze indotte durante l'installazione. Anche se si possono avere condizioni di carico dovute alla combinazione di sollecitazioni interne ed esterne alla tubazione, esse vengono trattate separatamente. Ricordiamo che la pressione interna applicata alla tubazione per mezzo del fluido trasportato, riduce significativamente gli effetti indotti da eventuali carichi esterni. Eccezione è fatta quando si ha a che fare con una condotta in aspirazione con pressioni di esercizio negative dove occorrerà sempre fare un'analisi con le pressioni indotte dall'esterno.

La determinazione dei carichi

Nel determinare a quale valore di carico è sottoposta la tubazione, fondamentale è la condizione del cavo di trivellazione ovvero, se mantiene la sua stabilità rimanendo aperto oppure collassa. Questo dipende in gran parte dal tipo di suolo attraversato, dalla tecnologia di scavo impiegata, dall'eventuale acqua di falda e dalla presenza o meno dello slurry. Se il cavo non si deforma dopo la trivellazione per la creazione del cosiddetto "effetto arco", i carichi si ridistribuiscono al terreno circostante e solo una piccolissima pressione del terreno viene trasmessa alla tubazione.

Nel caso specifico la pressione che si esercita intorno alla tubazione è di tipo idrostatico per la presenza dello slurry e/o dell'acqua di falda. Ricordiamo che lo slurry contribuisce a far restare aperto il cavo e a non farlo collassare.

Per contro, se il foro collassa o si deforma sostanzialmente, i carichi indotti dal terreno saranno applicati alla tubazione. Quando l'effetto arco non si crea, la pressione esterna agente sulla tubazione è la somma della combinazione della pressione del terreno, dell'acqua di falda e dei carichi di esercizio.

Nel caso di attraversamenti di corsi d'acqua in terreni non consolidati, si verifica un leggero effetto arco. Si può parlare verosimilmente di carichi geostatici.

Nei terreni consolidati si crea l'effetto arco e la pressione applicata sulla tubazione è minore di quella geostatica anche dopo il totale collasso del cavo intorno al tubo. Se ci troviamo in presenza di argille sovraconsolidate, terreni cementati o parzialmente stratificati, il cavo può restare aperto e le deformazioni essere piccolissime o addirittura assenti. In questo caso si possono considerare i soli carichi dovuti all'eventuale presenza dello slurry o dell'acqua di falda.

A seconda delle condizioni del borehole, la pressione esterna netta può essere riassunta dalle seguenti equazioni:

$$P_{est} = P_{ter} + P_W + P_{SE} - P_{int}$$

$$P_{est} = P_{bentonite} + P_W - P_{int}$$

Dove:

P_W = pressione acqua di falda

P_{ter} = pressione terreno sul tubo

P_{int} = pressione interna al tubo

P_{SE} = pressione sovraccarichi esterni agenti durante la vita della tubazione (veicoli, manufatti, ecc.)

$P_{bentonite}$ = pressione idrostatica della bentonite o slurry (se presente).

La prima equazione è applicabile nel caso di deformazione o collasso del foro e la seconda equazione nel caso di foro stabile e aperto.

La pressione idrostatica della bentonite può essere calcolata con l'equazione seguente:

$$P_{bentonite} = \gamma_{bentonite} \cdot H_{bentonite}$$

Dove:

$\gamma_{bentonite}$ = peso specifico fango bentonitico o slurry

$H_{bentonite}$ = altezza tra il punto più basso del borehole e il punto più alto della vasca della bentonite dell'Entry o dell'Exit point

Quando si calcola la pressione esterna netta, si devono considerare tutti i carichi applicati con la loro durata. Infatti, tubazioni di una certa importanza sono sottoposte a cicli d'esercizio che includono la condotta non pressurizzata o drenata, la pressione durante l'esercizio, l'allagamento, lo stop della circolazione del fluido all'interno, pressioni negative o eventi di picchi di pressione. In ognuno di questi casi, si potrebbero avere diversi valori di pressioni esterne nette e, quindi, il progettista dovrà valutarli con accuratezza e stabilire quale sarà il caso di progetto (evento più sfavorevole che potrebbe verificarsi durante la fase d'installazione o vita di esercizio della tubazione stessa).

Il PE è un materiale viscoelastico e le sue proprietà sono influenzate anche dal tempo d'applicazione dei carichi. Una tubazione può resistere bene alla pressione del suolo e all'acqua di falda grazie al modulo di rigidità apparente, ma se ipotizziamo l'azione di un colpo d'ariete nella condotta con un'improvvisa pressione negativa al suo interno, la pressione esterna netta sarà pari alla somma algebrica di quella esterna più il vuoto. Poiché la sovratensione è istantanea, ad essa si oppone il modulo apparente a breve termine del tubo che generalmente è ben quattro volte superiore di quello a lungo termine. Da tener presente altresì, che i carichi esterni possono variare nel tempo come nel caso di allagamenti.

Quando il cavo si deforma si possono avere due casi: che il terreno si deformi in maniera lieve plasticizzandosi, ma senza che vi siano distacchi che vadano ad interessare la tubazione; che tutto il terreno del cavo si plasticizzi fino alla rottura interessando la tubazione.



5. Il vibrovaglio di separazione cutting dallo slurry



In caso di collasso non è semplice scrivere un'equazione che tenga conto di molti fattori spesso non verificabili e/o prevedibili per la determinazione esatta del peso del terreno intorno alla tubazione. Ci sono diversi metodi empirici, tra i quali quello di assumere come carico indotto dal terreno sul tubo il peso generato dal volume individuato da un anello ideale del 10% più grande della dimensione del foro stesso che corre lungo il cavo d'installazione e per l'intero tratto interessato dalle deformazioni. Oltre tale limite, si ipotizza il verificarsi dell'effetto arco con una redistribuzione delle tensioni nel terreno circostante.

Se il foro crolla e non si crea alcun effetto arco, una parte considerevole di terreno interesserà la tubazione installata con un carico di tipo prismatico e la pressione esterna sarà pari al prodotto del peso specifico del terreno interessato per l'altezza della copertura di terreno sul tubo.

Questa tipologia di carico prismatico si sviluppa verosimilmente qualora ci sia presenza di sovraccarichi, quando il borehole attraversa terreni non consolidati come nel caso degli attraversamenti fluviali ovvero, quando il borehole sia interessato dalla presenza di carichi dinamici.

Molto spesso l'acqua di falda è presente all'interno della formazione del terreno e quindi, la sua pressione, va a sommarsi alla pressione esterna. Si possono presentare tre casi: il primo quando la superficie libera dell'acqua coincide con il livello del suolo; il secondo quando la superficie libera dell'acqua è al di sotto del livello del suolo rispetto alla tubazione; il terzo caso infine quando il livello dell'acqua è al di sopra del suolo stesso rispetto alla tubazione. Il terzo caso si verifica allorché la tubazione attraversa un fiume o un lago. Analiticamente i tre casi possono essere sintetizzati in due equazioni, ovvero:

$$P_{est} + P_W = \gamma_{terEff} \cdot H_{ter} + \gamma_W \cdot H_W$$

$$P_{est} + P_W = H_W (\gamma_{terEff} + \gamma_W) + \gamma_{terDry} (H_{ter} - H_W)$$

Dove:

γ_{terEff} = peso specifico efficace del terreno

γ_{terDry} = peso specifico del terreno asciutto.

Nell'ordine, la prima equazione è valida per il primo e terzo caso mentre la successiva per il secondo caso.

Può capitare che la tubazione installata sia interessata da carichi dinamici quale può essere il traffico veicolare in superficie. L'esperienza, supportata da studi analitici, suggerisce di posizionare la tubazione ad una profondità di 50 cm sotto la superficie del terreno, affinché il terreno possa sviluppare una corretta interazione strutturale. Con l'installazione TOC, questo requisito minimo viene superato significativamente.

Il normale processo di progettazione consiste nel calcolare i carichi applicati sulla tubazione selezionando una tubazione in PE di tentativo e calcolando così il fattore di sicurezza per questa condotta. Se il fattore di sicurezza è adeguato possiamo ritenere la progettazione terminata, altrimenti occorrerà continuare scegliendo una nuova tubazione di tentativo con caratteristiche migliori. Di solito si stabilisce un fattore di sicurezza per ogni valore di performance al quale la tubazione dovrà resistere.

Va evidenziato che la pressione esterna, genera una pressione di compressione sulle pareti del tubo installato con conseguente deformazione dello stesso, nota come ovalizzazione. Se la tubazione supera il valore limite di carico a compressione, si avrà una rottura per carico di punta mentre, una pressione esterna non uniforme che produce il superamento del valore limite di deformazione delle pareti, porterà ad un'ovalizzazione della stessa. Entrambi i valori limite sono direttamente proporzionali al modulo apparente di elasticità del materiale. Un'attenta considerazione deve essere data alla durata e alla frequenza di ciascun carico applicato e scegliere, in fase di progettazione, un materiale capace di garantire certe performance in funzione dei carichi applicati e del tempo d'azione degli stessi. A tal proposito, diventa di fondamentale importanza l'analisi del comportamento della tubazione durante l'installazione (Pull-back) sotto l'azione di tiro del Rig. Si considererà la tensione di snervamento del materiale PE impiegato ed i tempi d'applicazione delle azioni di trazione. Infatti, la tensione di snervamento ammissibile per il tubo diminuisce con l'aumentare del tempo di pull-back e, quindi, è una funzione del tempo nonché della temperatura.

Per le azioni di tiro durante il pull-back o per il carico da terreno agente sul tubo a causa della non stabilità del cavo, può verificarsi un'ovalizzazione: un'azione sul tubo che causa la diminuzione del diametro verticale e un aumento di quello orizzontale. L'ovalizzazione determina la riduzione della pressione idrostatica di collasso e genera trazione nelle pareti del tubo. Occorrerà, quindi, verificarne la rigidità e stabilire se sia adatto a limitare l'ovalizzazione. A volte il terreno circostante il tubo, può contribuire al contrasto dell'ovalizzazione, ma una progettazione conservativa vede ignorare questo contributo.

Se la pressione esterna aumenta fino a raggiungere il valore critico per la tubazione, vi è un'improvvisa e grande deformazione verso l'interno della parete del tubo chiamata buckling. Vincolare il tubo al terreno riempiendo la cavità tra foro e tubazione con malta cementizia al completamento dell'installazione, permetterà ad essa di resistere a pressioni esterne maggiori rispetto a quando la cavità viene lasciata vuota. Tuttavia, è prassi comune nella progettazione considerare nullo tale contributo.



6. Il varo di una tubazione in PE giuntata a caldo



La determinazione della forza di pull-back

Durante il pull-back, la tubazione è sottoposta a forze di trazione assiali generate dall'attrito tra tubo e pareti del foro, dall'eventuale slurry ovvero, dalla forza d'attrito che si genera dallo scorrimento della colonna di varo sulla superficie del terreno. Inoltre, la tubazione, può essere sottoposta a sollecitazioni di flessione dovute al raggio di curvatura del cavo di trivellazione e che generalmente trascuriamo.

Grandi impianti di perforazione possono esercitare da 40 a 250 t di forza di trazione. Questa forza viene applicata alle aste di trivellazione/tiro e all'alesatore che precede la colonna di varo durante il pull-back. Tuttavia, la determinazione della forza totale di pull-back effettivamente trasmessa alla tubazione è di difficile calcolo. Le caratteristiche della tubazione devono essere selezionate in modo che la tensione di trazione nella parete del tubo non superi la tensione di trazione ammissibile del materiale. Aumentando lo spessore delle pareti del tubo, si avrà un aumento dello sforzo di trazione ammissibile. Si è verificato sperimentalmente che pur aumentando il peso della tubazione, la forza di tiro non subisce incrementi significativi. Con un calcolo semplificato, la forza di pull-back può essere determinata come segue ipotizzando un foro dritto:

$$F_{pullback} = m \cdot \sum w_v \cdot L$$

Dove:

m = coefficiente d'attrito tra slurry e tubazione (0,25) o tra foro e tubazione (0,40)

$\sum w_v$ = somma delle forze verticali (positive o negative) sulla tubazione

L = lunghezza della tubazione

Nel caso il cui sia presente lo slurry nel foro di trivellazione, $\sum w_v$ è uguale alla spinta idrostatica esercitata sul tubo meno il peso della tubazione meno il contenuto del tubo stesso. Infatti, capita spesso durante il varo, che la tubazione venga riempita completamente di acqua allo scopo di far ridurre significativamente la forza di galleggiamento esercitata dallo slurry e, quindi, diminuire la forza di trazione applicata.

Per contro, se il tubo è installato senza riempimento, esso tenderà a galleggiare toccando la generatrice superiore del foro generando attrito tra tubo e terreno.

Durante il pull-back, lo slurry viene spostato dal tubo lubrificando le zone di contatto con il foro. Se si interrompe il pull-back e il tubo si ferma, il flusso del fango si arresta e la forza di galleggiamento, che inizia a prevalere, spinge il tubo

Coppia al RIG	Lunghezza di trivellazione	Diametro del tubo da installare (Inch)
0÷55.000 Nm	fino a 200 m	fino a 6"
55.001÷105.000 Nm	fino a 400 m	fino a 10"
105.001÷215.000 Nm	fino a 500 m	fino a 12"
215.001 Nm in su	da 501 m in su	superiore a 12"

7. I valori tipici della lunghezza di trivellazione/diametro installabile in funzione della potenza del Rig

verso l'alto facendo defluire lo slurry lungo l'asse del foro in direzione dell'entry e dell'exit point. Dopo un certo tempo, il tubo verrà spinto sempre più verso l'alto fino a toccare la parte alta del cavo.

Non è raro che si abbia il blocco della tubazione a causa del decantamento del fango bentonitico. Non sempre l'applicazione di una maggiore forza di tiro è in grado di far ripartire il tubo che ormai si trova nello slurry decantato e fermo. Per tale motivo, quando si avvia il varo di una condotta che abbia un diametro importante, esso non può essere più fermato se non per un brevissimo tempo (max 10 minuti) per eseguire le operazioni di rimozione aste al Rig.

Conclusioni

L'installazione mediante TOC di una tubazione in PE è sottoposta prevalentemente a due ordini di stress. Il primo è costituito dall'inevitabile attrito causato dall'infilaggio del tubo nel terreno (funzione anche della stabilità del foro), mentre il secondo, è costituito dalla trazione alla quale è sottoposta la tubazione durante il pull-back. Entrambi gli stress sono di difficile quantificazione e dipendono da molte variabili, tra cui la lunghezza della trivellazione, la curvilinearità del tracciato, la tipologia di terreno, il rapporto tra il diametro medio interno del foro alesato e il diametro esterno del tubo e il procedimento di perforazione (secco o umido).

Ciò impone che gli accorgimenti atti a limitare gli effetti dello stress sui tubi, debbano essere accurati e di un certo impegno progettuale. Con scrupolo e rigore si dovrà procedere alla scelta dei materiali da impiegare e alla preparazione di procedure operative da adottare, considerato che la delicata fase di varo del tubo non ammette errori, quantomeno quando si tratta di diametri di una certa entità. Se fallisce il varo di un tubo, potrebbe essere necessario ricominciare dall'inizio ogni cosa approntando una nuova TOC parallela. ■

* *Ingegnere Progettista e Project Manager della Saipem SpA*

BIBLIOGRAFIA

- [1]. M. Chiarelli - "L'Arte del costruire gallerie" - Editrice Uni Service, Trento, 2009.
- [2]. M. Chiarelli - "L'attraversamento di aree in frana con rilevati stradali e ferroviari super leggeri", "Strade & Autostrade" n° 78, EDI-CEM Srl, Milano.
- [3]. M. Chiarelli - "Lo scavo meccanizzato TBM nella realizzazione di Tunnel", Atti del Convegno, Fiera Internazionale del Libro, Lingotto Fiere, Torino, 2009.
- [4]. M. Chiarelli - "Le vibrazioni degli edifici indotte dalle ferrovie sotterranee", "Strade & Autostrade" n°44, EDI-CEM Srl, Milano.
- [5]. M. Chiarelli - "Il rinforzo delle Pavimentazioni stradali in conglomerato bituminoso con reti in fibra di vetro", "Strade & Autostrade" n° 47, EDI-CEM Srl, Milano.
- [6]. M. Chiarelli - "Le argille espanse nella costruzione di rilevati artificiali", Atti del Convegno "Manutenzione Ordinaria e Straordinaria della rete viaria", Ente Provincia di Macerata (settore viabilità) ed ANAS, Macerata, Gennaio 2004.
- [7]. ASTM F 1962 - "Guide for Use of Maxi-Horizontal Directional Drilling for Placement of Polyethylene Pipe or Conduit Under Obstacles, Including River Crossing".