FIUMI PO ED ADIGE

Snam attraversamenti da record con microtunnelling

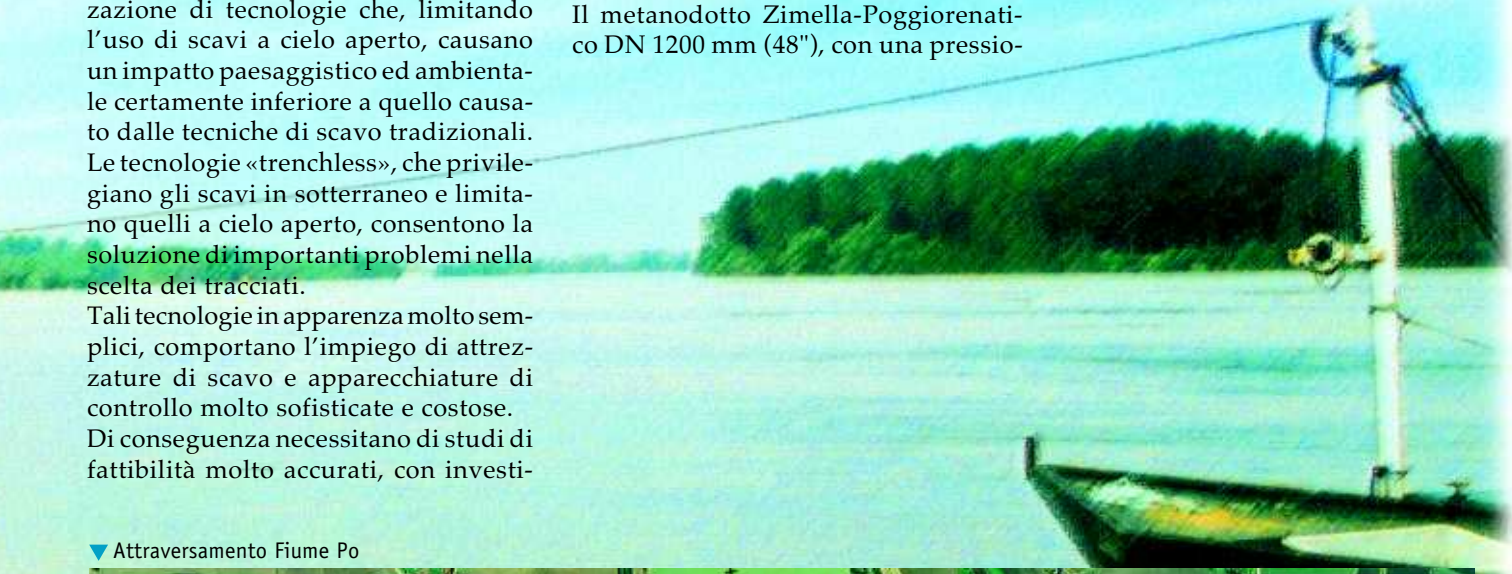
Nel programma di sviluppo della rete energetica nel nostro Paese, strategico per la SNAM è il potenziamento dei metanodotti di importazione dalla Russia.
Nel tratto Zimella-Poggio Renatico il tracciato del gasdotto ha incrociato il corso dei fiumi Po ed Adige.
Di seguito sono descritti i sistemi di attraversamento dei due corsi d'acqua e di montaggio delle condotte.

PLANIMETRIA GENERALE
Attraversamento fiume Adige
Attraversamento fiume Po

Inquadramento generale

U. Lazzarini (SNAM Spa)

Da sempre, nella progettazione e realizzazione di gasdotti, l'attraversamento di corsi d'acqua ha rappresentato e rappresenta un problema da risolvere. Recentemente, l'esigenza di un più accurato rispetto ambientale nelle aree interessate dalla costruzione di infrastrutture, ha accentuato le difficoltà, spingendo i progettisti verso l'utilizzazione di tecnologie che, limitando l'uso di scavi a cielo aperto, causano un impatto paesaggistico ed ambientale certamente inferiore a quello causato dalle tecniche di scavo tradizionali. Le tecnologie «trenchless», che privilegiano gli scavi in sotterraneo e limitano quelli a cielo aperto, consentono la soluzione di importanti problemi nella scelta dei tracciati.
Tali tecnologie in apparenza molto semplici, comportano l'impiego di attrezzature di scavo e apparecchiature di controllo molto sofisticate e costose.
Di conseguenza necessitano di studi di fattibilità molto accurati, con investigazioni sul campo che permettano una puntuale caratterizzazione dei terreni nelle aree interessate dai lavori, onde consentire agli esperti di perforazione di individuare la metodologia di scavo più adatta al lavoro da effettuare.
La Snam, prima in Italia, utilizza queste tecnologie ormai da diversi anni. Dal 1982 ad oggi ha installato circa 30.000 m di condotte con il metodo della «Trivellazione Orizzontale Controllata» (Horizontal Directional Drilling) e dal 1992 ad oggi ha realizzato oltre 11.400 m di tunnel di piccolo diametro, nei quali alloggiare le condotte, con la metodologia del «Microtunnelling».
Il metanodotto Zimella-Poggiorenatico DN 1200 mm (48"), con una pressione di esercizio di 75 bar, fa parte del potenziamento dei metanodotti di importazione dalla Russia, in corso di realizzazione.
In questo tratto del gasdotto i lavori interessano gli alvei di due importanti fiume: il Po, maggior corso d'acqua della nostra penisola, e l'Adige. Il tracciato di questo nuovo metanodotto segue, per quanto possibile, quello della condotta DN 900 mm esistente, realizzato negli anni '80. E' ovvio che nella fase di studio dei tracciati e successivamente in quella di progettazione, si utilizzino tutte



▼ Attraversamento Fiume Po

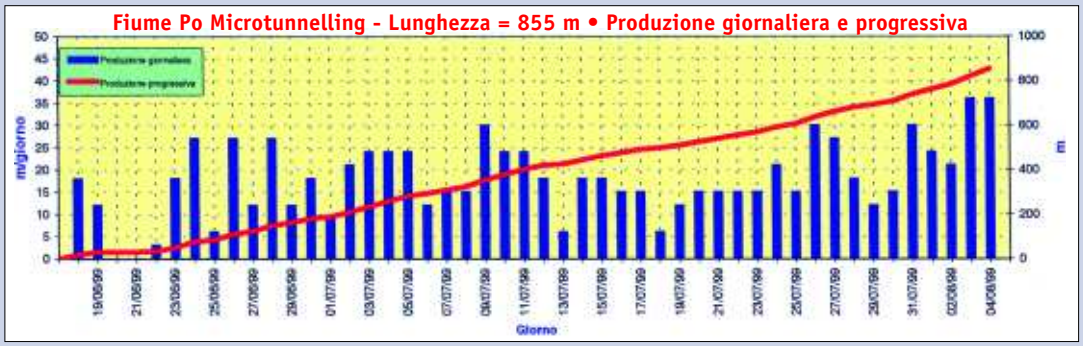
Microtunnelling

Questa tecnologia consiste nella realizzazione di tunnel di piccolo diametro mediante l'avanzamento di uno scudo cilindrico, cui è applicato frontalmente un sistema di scavo. L'avanzamento è sostenuto dalla spinta di martinetti idraulici, montati su un telaio metallico e da un anello di spinta, mobile, posto davanti ai martinetti, ed è guidato da un sistema laser che consente di evidenziare tempestivamente gli eventuali errori di traiettoria e di applicare conseguentemente le necessarie correzioni. La perforazione inizia da una postazione di spinta, dove viene realizzato un muro reggispinta, e raggiunge la postazione d'arrivo, in corrispondenza della quale viene rimossa l'unità di perforazione. Il procedere dell'unità di perforazione viene seguito dal rivestimento del tunnel che, generalmente costituito da conci in calcestruzzo armato o da barre di tubo camicia in acciaio, è spinto da uno o più sistemi di martinetti. L'unità di perforazione può essere costituita da scudi aperti in cui la fresa o la benna in testa effettua lo scavo (perforazione a sezione piena o puntuale) o da scudi chiusi con la testa fresante mantenuta in pressione contro il fronte scavo.

Microtunneller AVN 2000 D

Il materiale scavato viene frantumato e portato all'esterno mediante trasporto meccanico o a gravità mediante fluidificazione. Terminata l'esecuzione del microtunnel, che in ambito SNAM è stato distinto in minitunnel e microtunnel, a seconda dell'accessibilità o meno al fronte di scavo, viene inserita al suo interno la condotta. L'intercapedine tra tubo di linea e rivestimento viene intasata con materiale opportunamente studiato, quali sabbia o miscele di bentonite cemento ed acqua.

Più recentemente, dopo ricerche mirate, è stata utilizzata una mi-

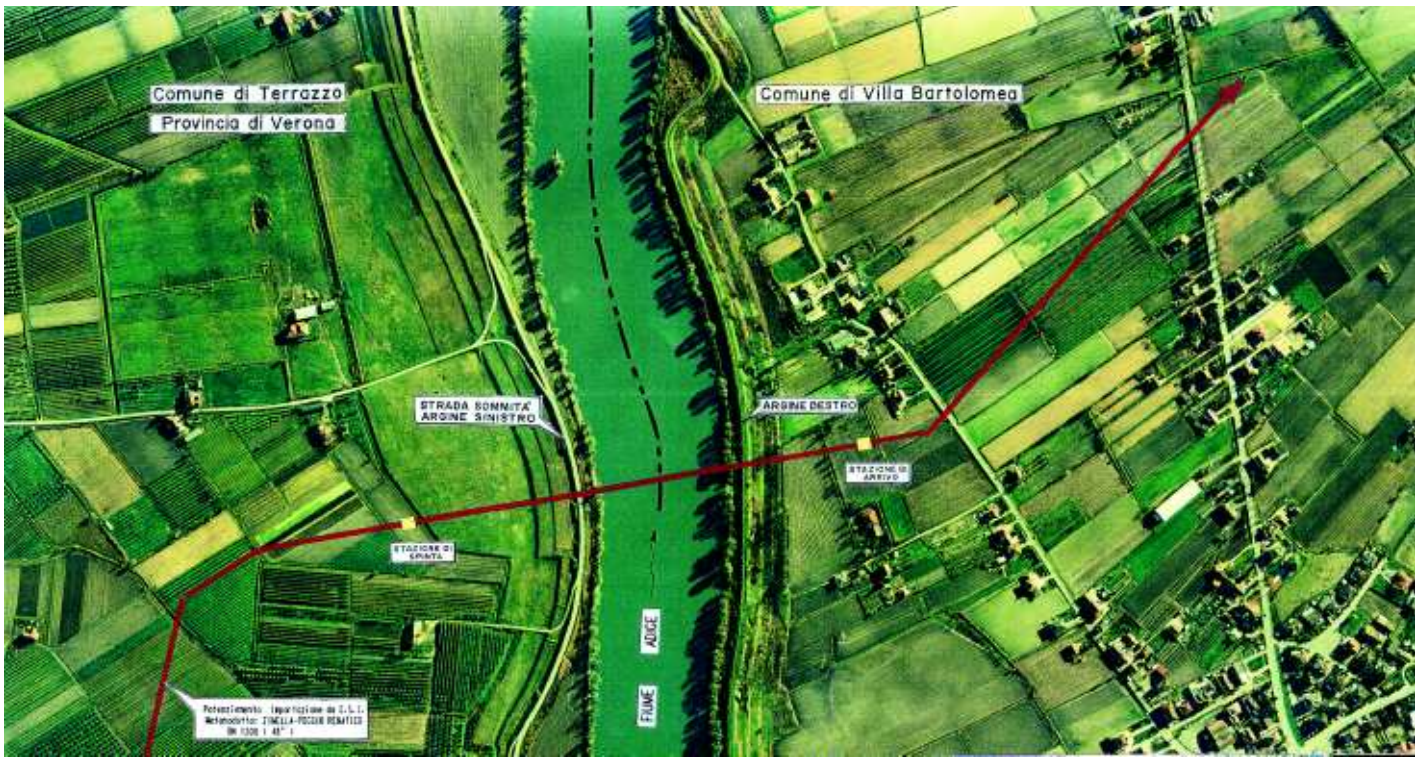


le informazioni storiche relative all'esistente impianto, cercando di evitare o limitare le problematiche costruttive e/o autorizzative incontrate a suo tempo.

La realizzazione degli attraversamenti di questi due importanti fiumi era quindi ritenuta il punto critico di tutto il tracciato fra Zimella e Poggiorenatico, lungo 65,8 km.

Come sempre si è proceduto ad effettuare un accurato studio di fattibilità per ciascun fiume onde individuare il punto migliore dove realizzare l'attraversamento e reperire i parametri ne-

▼Attraversamento Fiume Adige



scela autoindurente composta da inerte fine, cemento, acqua e polimero aerante - fluidificante.

Applicabilità e criteri di scelta

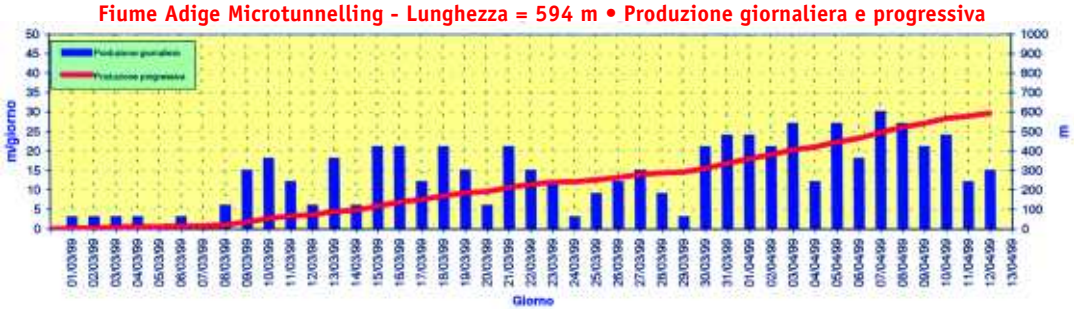
Qualsiasi metodologia trenchless si voglia applicare, ma il discorso è comunque valido anche per le tecniche tradizionali, non si può prescindere da uno studio preliminare e di dettaglio, che porti alla progettazione esecutiva dell'opera da realizzare.
Lo studio dovrà basarsi su ricerche di tipo bibliografico e su un esame geomorfologico del sito e successivamente su un'indagine geognostica mirata all'opera da realizzare ed all'ostacolo da attraversare, sulla scorta anche di un rilievo topografico in scala adeguata.
Nel caso dell'attraversamento di un corso d'acqua, nella fase di studio di dettaglio, si deve anche procedere alla definizione delle caratteristiche idrologiche-idrauliche dello stesso, indispensabili per determinare la copertura di sicurezza per la condotta in progetto.
L'indagine geognostica comporta l'esecuzione di sondaggi a carotaggio continuo, il prelievo di campioni indisturbati e rappresentativi e il loro esame di laboratorio per la definizione delle caratteristiche geotecniche; talora, in caso di ammassi rocciosi, può far parte integrante dell'indagine geognostica anche un'indagine geofisica.
I sondaggi geognostici vengono eseguiti solitamente in verticale, ma, nel caso di tunnel, possono essere eseguiti orizzontalmente, a partire dal possibile imbocco del tunnel stesso.
Dette caratteristiche guidano la successiva scelta progettuale relativa all'applicabilità delle metodologie trenchless in funzione sia delle suddette caratteristiche geolitologiche, sia delle potenzialità intrinseche alle attrezzature disponibili sul mercato.
La tabella propone le potenzialità attuali in funzione del diametro e della lunghezza.

POTENZIALITÀ ATTUALI	
DIAMETRO (mm)	LUNGHEZZA (m)
< 300	c.a. 80
300 ÷ 500	c.a. 120
500 ÷ 1000	c.a. 150
1000 ÷ 1500	c.a. 300
1500 ÷ 2000	c.a. 1000
> 2000	> 1000

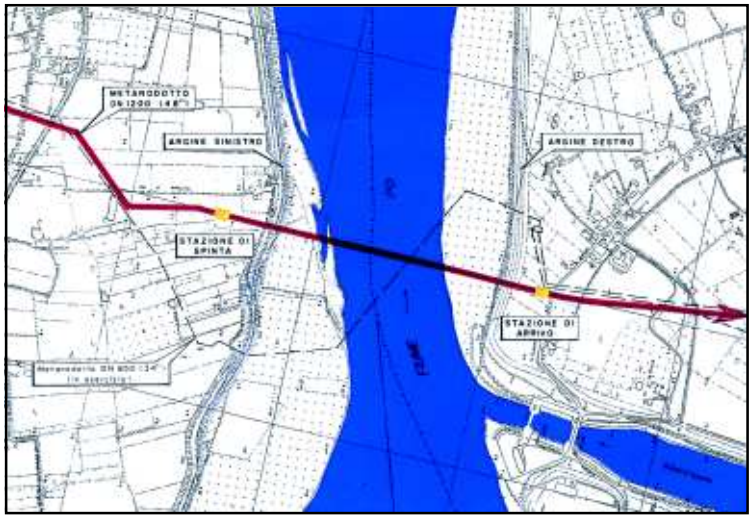
Applicazioni

• Attraversamento di nodi viari, ferroviari, di infrastrutture in ge-

Fiume Adige Microtunnelling - Lunghezza = 594 m • Produzione giornaliera e progressiva



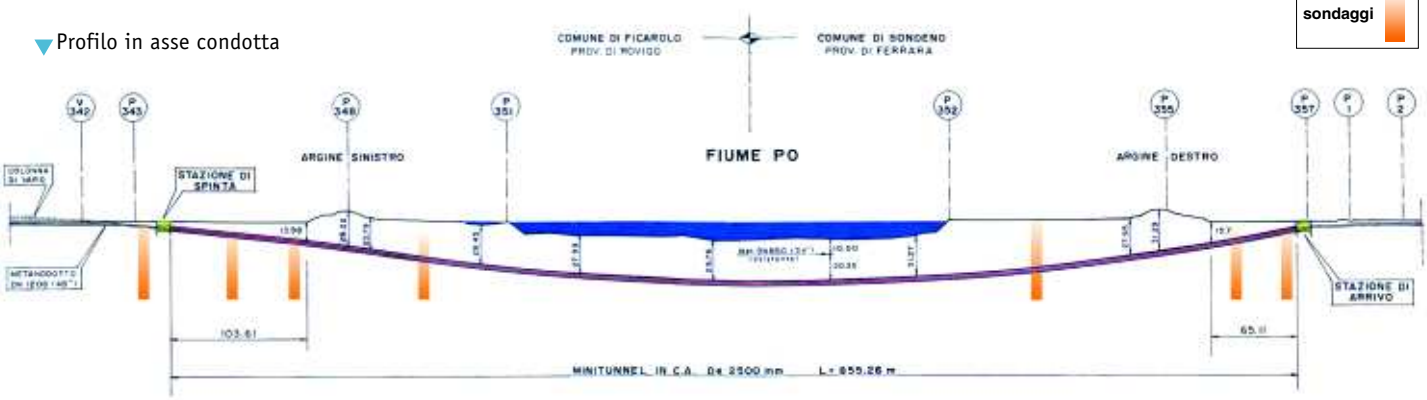
cessari alla progettazione. A seguito di questi studi, corredati da indagini geognostiche, prove di laboratorio, esame di documentazione storica e studio idrologico-idraulico, si sono individuate diverse soluzioni progettuali.
La scelta finale, per entrambi i corsi d'acqua, è stata quella di realizzare gli attraversamenti con la metodologia di microtunnel curvilineo. Tale metodologia, mai impiegata prima d'ora in Italia, consente di ridurre sensibilmente la profondità delle postazioni di partenza (spinta) e di arrivo della perforazione e, nel contempo, facilita l'immissione della condotta in acciaio del gasdotto all'interno del tubo di protezione costituente il microtunnel. Le maggiori perplessità nell'utilizzare questa nuova tipologia di microtunnel non dipendevano dalla fase di realizzazione del tunnel, ma dalle difficoltà connesse con l'infilaggio-varo



▲ Planimetria

ATTRAVERSAMENTO PO

▼ Profilo in asse condotta

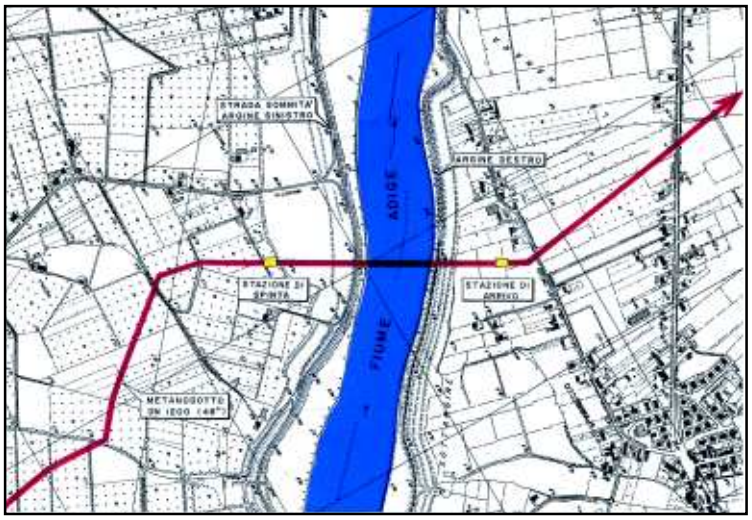


PRINCIPALI ATTRAVERSAMENTI RETTILINEI REALIZZATI								
DENOMINAZIONE TUNNEL	ANNO	METANODOTTO OLEODOTTO	DN (mm)	LOCALITÀ (m)	LUNGH. (mm)	De FORO (mm)	TIPO FRESA	DATI GEOLOGICI
Dosso Incoronata	1993	Oricola-Vastogirardi	1200	Sulmona (AQ)	340	1940	AVN fresa piena sez.	Siltite
Autostr.Roma-Pescara	1993	Oricola-Vastogirardi	1200	Aielli (AQ)	190	1940	AVN fresa piena sez.	Ghiaia e sabbia
Canale Cavour e Naviglio Langosco	1995	Ripalta-Mortara	1200	Gambolò (PV)	200	1940	AVN fresa piena sez.	Sabbia media
Dosso T 1	1995	Grumento Nova-Bernalda	1050	Missanello (PZ)	231	2600	Westfalia - scudo ap. con fresa puntuale	Conglomerato molto cementato
Dosso T 3	1995	Grumento Nova-Bernalda	1050	Missanello (PZ)	243	2600	Westfalia - scudo ap. con fresa puntuale	Conglomerato molto cementato
Dosso T 4	1995	Grumento Nova-Bernalda	1050	Missanello (PZ)	291	2600	Westfalia - scudo ap. con martellone	Conglomerato molto cementato
Dosso T 4/A	1995	Grumento Nova-Bernalda	1050	Missanello (PZ)	255	2600	Westfalia - scudo ap. con fresa puntuale	Conglomerato molto cementato
Dosso T 5	1995	Grumento Nova-Bernalda	1050	Missanello (PZ)	285	2600	Westfalia - scudo ap. con fresa puntuale	Marna e conglomerato
Dosso Mastronieri	1996	Montalbano-Messina	1200	Milazzo (ME)	186	1940	AVN fresa piena sez.	Arenaria poco cementata, ciottoli quarzosi, conglomerato
Dosso Castello D'Orlando	1996	Montalbano-Messina	1200	Novara di Sicilia (ME)	705	2320	Westfalia - scudo ap. con fresa sez. piena	Alternanza di arenarie, marne e conglomerati, con vene quarzose
Dosso e S.P. Salice	1996	Montalbano-Messina	1200	Milazzo (ME)	300	1940	AVN fresa piena sez.	Gneiss fratturato
Dosso Piano di Comi	1996	Montalbano-Messina	1200	Milazzo (ME)	162	1940	AVN fresa piena sez.	Gneiss fratturato
Centrale di Ponte	1998	Masera-Passo Gries	1200	Formazza (VB)	195	1940	AVN fresa piena sez.	Gneiss fratturato; detrito di galleria

nere e aree ad alta densità abitativa.
- Attraversamento in subalveo di corsi d'acqua.
- Superamento di dossi rocciosi di difficile realizzazione e/o di particolare pregio ambientale.
- Superamento in contemporanea di più ostacoli naturali ed artificiali (fiumi, torrenti, strade, canali, dighe, ecc.).
- Realizzazione di approdi costieri.
- Realizzazione di parallelismi con servizi esistenti.
- Superamento di aree di rilevante importanza ambientale e/o archeologico.

Vantaggi
- Esecuzione indipendente da fenomeni idraulici che coinvolgono il corso d'acqua e posa della condotta a profondità di sicurezza da possibili azioni geomorfologiche legate all'evoluzione del corso d'acqua stesso. Rispetto dell'alveo e delle sponde con conseguente eliminazione di opere di ripristino.
- Attraversamento di dossi rocciosi con direttrici assai più brevi rispetto a percorsi esterni e con consistenti riduzioni degli interventi di ripristino.
- Esecuzione delle opere con ridotto recupero ambientale delle aree interessate dai lavori.
- Esecuzione delle opere con ridotta interferenza con le attività commerciali e sociali e con le infrastrutture in genere, anche in aree urbane.

Sviluppi
- Realizzazione di trivellazioni di lunghezza superiore ai 1.000 m, anche con l'ausilio del sistema tubbing che permette l'autoavanzamento della fresa ed il rivestimento in continuo del tunnel mediante conci in c.a..
- Superamento di pendenze maggiori dell'attuale 30%.
- Posa di condotte in c.a., utilizzabili come tubo

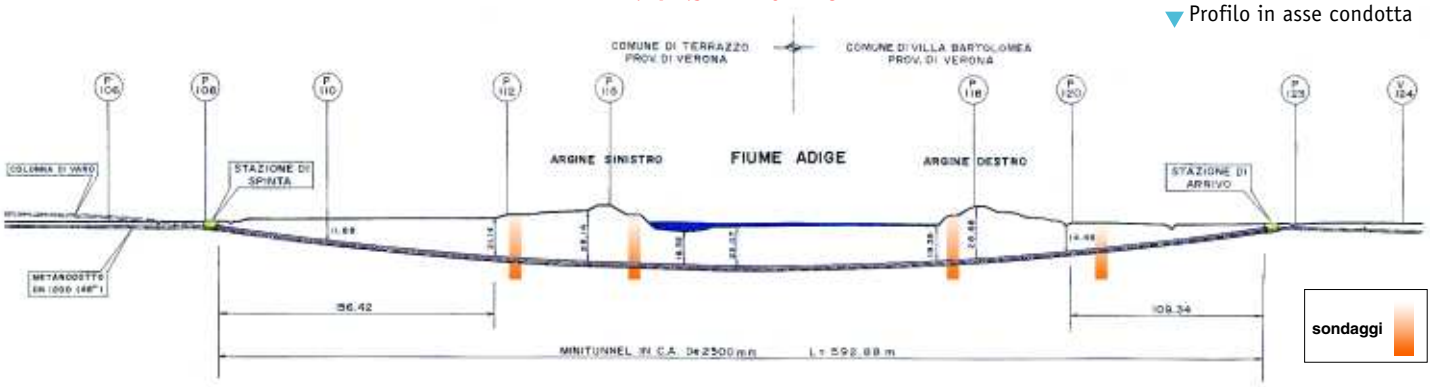


▲ Planimetria

della tubazione in acciaio all'interno del tubo di rivestimento in c.a., garantendo nel contempo l'integrità del rivestimento protettivo della condotta in acciaio.
A questo scopo, è stata prevista l'installazione sulla condotta di appositi anelli distanziatori in resina poliuretanica bicomponente. Prove in campo, oltre alla consultazione delle schede tecniche del prodotto, hanno permesso di constatare la perfetta aderenza dei collari alla condotta, e la discreta elasticità del prodotto utilizzato.
Completate le fasi di indagine, fattibilità e progettazione, sono state affrontate le problematiche relative all'appalto dei lavori. Constatato che i tempi e le fasi di realizzazione del metanodotto nel suo insieme, sono di norma non coincidenti con le tempistiche realizzative di opere specialistiche, quali gli attraversamenti di importanti corsi d'acqua, e, nel contempo, ritenendo di

ATTRAVERSAMENTO ADIGE

▼ Profilo in asse condotta



di protezione, con un battente idrico molto elevato (anche superiore ai 4,5 bar).
• Miglioramento della applicazione per la realizzazione di profili curvilinei, in particolare: riduzione della profondità delle postazioni e ottimizzazione dei raggi di curvatura da utilizzare in funzione del varo della condotta in acciaio.

Considerazioni sui costi
La scelta delle tecnologie trenchless, in sostituzione a metodi tradizionali di scavo, può essere motivata da diversi fattori, quali:
• fattibilità;
• confronto economico;
• obblighi derivanti dall'ottenimento di permessi pubblici e/o privati.
Un confronto economico esauriente fra le varie tecniche, oltre ai puri costi di realizzazione dell'opera, deve tenere conto di altri elementi di valutazione quali:
• costi di realizzazione delle opere di ripristino ambientale necessarie;
• costi di realizzazione delle opere di protezione della condotta;
• costi di manutenzione ordinaria e straordinaria delle suddette opere;
• lunghezza dei possibili tracciati;
• costi sociali e/o costi indiretti quali:
- recupero ambientale più o meno lungo delle aree interessate;
- interferenza con attività sociali (disturbi al traffico, ridotta fruibilità dei luoghi, ecc.);
- danni/interferenze con infrastrutture e impianti terzi.
Tenuto conto di tutti i vari elementi di costo da considerare in un confronto economico fra le varie soluzioni progettuali disponibili, le soluzioni trenchless possono risultare competitive rispetto a quelle tradizionali.

ATTRAVERSAMENTI CURVILINEI REALIZZATI NEL 1999

DATI	FIUME PO	FIUME ADIGE	FIUME CANALBIANCO	FIUME LIVENZA	FIUME MONTICANO
LUNGHEZZA (m)	860	594	387	265	201
DIAMETRO MIN. INTERNO (mm)	2000	2000	2000	1600	1600
DIAMETRO DI SCAVO (mm)	2525	2525	2425	1960	1960
SPESSORE TUBI IN c.a. (mm)	250	250	200	170	170
DIAMETRO CONDOTTA (mm)	1200	1200	1200	1200	1200
RAGGIO ELASTICO COND. (m)	1200	1200	1200	1200	1200
RAGGIO DI CURVATURA (m)	1950	2055	1500	1200	1200
PROFONDITA' IN ALVEO (m)	25,00	15,30	6,30	6,00	5,70
PROFOND. PIEDE ARGINE	sin. 14 m; dx. 14 m	sin. 19 m; dx. 15 m	sin. 19 m; dx. 15 m	sin. e dx. 12 m	sin. e dx. 9,8 m
MAX. BATTENTE IDRICO DA SOMM. ARG.	circa 45 m	circa 29 m	circa 20 m	circa 19 m	circa 15 m
PRODUZIONI MEDIE (m/giorno)	17,8	14	13	11	11,2
PRODUZ. MASSIME (m/giorno)	36 (su 15 h)	30 (su 15 h)	30 (su 11 h)	24 (su 11 h)	27 (su 11 h)
DATI GEOLOGICI	In prevalenza sabbie con alternanze di livelli limosi e argillosi nei primi metri	In prevalenza sabbie con alternanze di livelli argillosi e con presenza di limi	Limi argillosi-sabbiosi consistenti (Nspt=15-18)	Strati alterni di limi, sabbie, argille, con ciottoli e ghiaia da -3 m a -11 m circa (max. 10 cm, in matrice sabbiosa)	Strati alterni di sabbie e limi; da -8 m ciottoli e ghiaia in matrice sabbiosa (max. 6 cm)

Principali microtunnel realizzati
La SNAM ha utilizzato questa tecnica, a partire dal 1992, per realizzare circa 11.400 m di tunnel di piccolo diametro in cui alloggiare condotte. Di cui:
• n. 43 attraversamenti con tubo di protezione in acciaio, per un totale di 2.948 m;
• n. 40 attraversamenti rettilinei con tubo di protezione in c.a., per un totale di 6.171 m;
• n. 5 attraversamenti curvilinei con tubo di protezione in c.a., per un totale di 2.307 m.

Fattibilità

FIUME PO

Inquadramento generale
L'attraversamento relativo al fiume Po interessa i territori dei Comuni di Ficarolo (Rovigo) e Bondeno (Ferrara), rispettivamente in sponda sinistra e destra idrografica: esso ricade in un tratto di fiume posto a valle di una considerevole ansa del corso d'acqua, in cui si individua la confluenza in sponda destra del fiume Panaro. Poco a monte, inoltre, l'argine destro si raccorda con quello del cavo Napoleonico controllato da rilevanti opere di sbarramento e regimazione, che non interferiscono con il metanodotto in progetto.
Entrambi gli argini del Po sono costituiti da rilevati molto alti, con numerosi contrafforti, e dominano una pianura intensamente coltivata. Poco a monte, all'interno della sponda sinistra, è presente un'ampia zona golenale coltivata a pioppeto, già utilizzata in occasione della precedente realizzazione; tale zona golenale tende a scomparire subito a valle dell'esistente gasdotto.
In destra la zona golenale, più ridotta, inizia dove termina quella della sponda opposta.
Già in occasione del precedente lavoro è stato necessario attraversare il corso d'acqua diagonalmente monte-valle (sinistra-destra) onde sfruttare al meglio le aree golenali.

Indagini geognostiche
L'accurata ed estesa campagna geognostica ha permesso di caratterizzare i terreni interessati dai lavori. Sono stati infatti eseguiti, in due successive campagne, sei sondaggi a carotaggio continuo (spinti fino a -30 m da piano campagna) in corrispondenza del possibile tracciato da realizzare mediante scavo a cielo aperto e ulteriori sei sondaggi (spinti fino a -40 m da piano campagna) in asse al tracciato della possibile perforazione in sotterraneo.
Entrambe le indagini hanno evidenziato un primo ampio strato fino a circa 15 m di profondità, caratterizzato da alternanze di livelli di sabbie, limi e argille, con mediocre caratteristiche di resistenza. Lo strato sottostante, fino a fondo foro (-40 m da p.c.), risulta caratterizzato da un potente deposito sabbioso piuttosto omogeneo: si tratta infatti di sabbie grigie, a granulometria medio fine, monogranulari, povere di matrice limosa e mediamente addensate.

Fiume Po

FIUME ADIGE

Inquadramento generale
L'attraversamento relativo al fiume Adige interessa, nella provincia di Verona, i territori dei Comuni di Terrazzo e Villa Bartolomea, rispettivamente in sponda sinistra e destra idrografica: esso ricade in un tratto subrettilineo del corso d'acqua, dove gli argini maestri, in entrambi i lati, sono direttamente addossati alle sponde fluviali dell'alveo di magra.
In particolare, solo in corrispondenza dell'attraversamento da parte dell'esistente metanodotto DN 900 mm, gli argini si discostano dalle sponde allargandosi leggermente e formando due ristrette

difficile reperimento la macchina per perforazione con le caratteristiche da noi richieste, è stato ritenuto opportuno appaltare i lavori separatamente ed in anticipo rispetto a quelli per la realizzazione dell'intero gasdotto.
La Ludwig Freytag, impresa tedesca specializzata nella costruzione di metanodotti, è risultata pertanto assegnataria dei lavori, a seguito di una gara internazionale con relativo bando CEE, alla quale hanno partecipato anche imprese specialistiche italiane.
Come previsto è stato necessario costruire appositamente un impianto di perforazione che fosse in grado di operare, sotto falda, a notevoli profondità. Tale impianto è stato realizzato dalla Herrenknecht principale azienda europea del settore.
Come si può notare dalle schede relative all'avanzamento dei lavori, in fase di perforazione non si sono incontrate grosse problematiche. Infatti, a parte la fase di avviamento della macchina e della taratura dei dissabbiatori, in funzione della litologia dei terreni da attraversare, si può ritenere che la fase di perforazione su entrambi i corsi d'acqua si sia svolta con regolarità.
E' molto importante rilevare che sia durante la fase di perforazione, sia durante la successiva fase di infilaggio/varo della condotta all'interno dei tunnel, non si sono mai riscontrate infiltrazioni d'acqua. I cantieri sono sempre stati a disposizione delle Autorità Idrauliche per verificare in qualsiasi momento la perfetta esecuzione delle opere e la conferma che con la tecnologia del microtunnelling non sussistono problematiche di tenuta idraulica.
Completati i lavori di scavo e preparati opportunamente i tunnel, si è provveduto al varo della condotta all'interno degli stessi. Le problematiche relative al varo sono state brillantemente risolte dalla Ludwig Freytag, portando a termine anche questa fase senza inconvenienti. Il successivo intasamento dell'intercapedine, fra il metanodotto ed il tunnel, con malta cementizia a bassa resistenza meccanica ed elevata fluidità, ha completato l'opera.
A tale proposito è importante rilevare che lo studio di pompabilità effettuato dall'Appaltatore sulla miscela prevista per l'intasamento, ha evidenziato reali difficoltà di messa in opera in tempi sufficientemente rapidi. Su proposta della Ludwig Freytag si è pertanto presa in considerazione e successivamente accettata una nuova miscela

aree golenali, delle quali quella in sponda sinistra abbastanza ampia, mentre quella in sponda destra è estremamente ridotta.
Entrambi gli argini sono costituiti da alti rilevati, con numerosi contrafforti, e dominano la circostante pianura adibita a coltura intensiva.

Indagini geognostiche
La campagna geognostica ha permesso di caratterizzare i terreni interessati dai lavori. Sono stati infatti eseguiti quattro sondaggi a carotaggio continuo (spinti fino a -30 m da piano campagna) in corrispondenza del possibile tracciato.
Dall'analisi delle stratigrafie ottenute è stata accertata la prevalente presenza di depositi sabbiosi generalmente a granulometria fine e/o medio fine, caratterizzati da percentuali molto variabili della matrice limosa intervallati a tratti da livelli di argille limose, talvolta compatte.
Il grado di addensamento delle sabbie è generalmente elevato: trattasi infatti di sabbie da moderatamente a molto addensate, con un miglioramento delle caratteristiche meccaniche con la profondità.
Sono state inoltre individuati dei livelli di sabbie poco addensate e di ghiaietto.

Conclusioni studio idrologico-idraulico
Sulla base dello studio idrologico-idraulico si può ipotizzare che le arature di fondo possano raggiungere rispettivamente 11 m di profondità per il fiume Po e 6 m di profondità per il fiume Adige e pertanto la copertura di sicurezza per la condotta non deve essere inferiore a tali dati.

Scelta della metodologia di scavo
La scelta del sistema di attraversamento, particolarmente nel caso di corsi d'acqua di rilevanti dimensioni, deve essere effettuata in modo da garantire la massima sicurezza sia in fase operativa che a lungo termine, tanto per la condotta in progetto, quanto per il fiume (alveo e rilevati arginali).

Scavo a cielo aperto
L'eventuale attraversamento a cielo aperto avrebbe dovuto essere realizzato in parallelismo con il metanodotto esistente, a monte dello stesso di circa 50 m per il fiume Po e 80 m per il fiume Adige, per evitare qualsiasi pericolo di danneggiamento in corso di esecuzione dei lavori e, nel contempo, si sarebbe dovuto utilizzare le aree golenali per tutte le operazioni di preparazione e varo della condotta.
Essendo poi impossibile interessare gli argini con lavori di movimento terra, l'attraversamento dei corpi arginali avrebbe potuto essere realizzato esclusivamente in sovrappasso, conformando la geometria di posa della condotta alla morfologia della sezione arginale e procedendo poi a ricoprire la condotta artificialmente con riporto di almeno 1.5 m di copertura, realizzando pertanto un ulteriore rilevato sopra il corpo arginale.
E' evidente che tale soluzione avrebbe comportato l'effettuazione di scavi in alveo, a una notevole profondità dall'alveo di magra (circa 14 m per il Po e circa 8 m per l'Adige), a breve distanza dal gasdotto esistente, con la possibilità che piene anche di modeste dimensioni avrebbero potuto inficiare in tutto o in parte i lavori di scavo, tenendo conto che tali operazioni necessitano di alcuni mesi per lo scavo, il successivo rinterro e i ripristini, e che sarebbe stata prevista la movimentazione (per due volte) di oltre 500.000 m^3 di terreno per il fiume Po e oltre 100.000 m^3 per il fiume Adige. Inoltre, il tracciato del fiume Po sarebbe stato di lunghezza quasi doppia rispetto ad un attraversamento ortogonale al corso d'acqua.
Appariva comunque evidente che questa metodologia realizzativa, pur essendo fattibile, avrebbe comportato una serie di problematiche costruttive che ne sconsigliavano l'attuazione, specie in presenza di soluzioni alternative.

Fiume Adige

Metodologie trenchless
Il ricorrere alle tecnologie trenchless, oltre che per motivazioni strettamente ambientali, diventava pertanto molto interessante anche sul piano strettamente tecnico. Peraltro la direttrice ideale per una soluzione con perfora-

che al lato pratico ha dimostrato di poter essere messa in opera con estrema facilità, con una resistenza finale superiore a quanto inizialmente previsto (a 28 gg circa 3,5 N/mm^2) ritenuta accettabile. L'impiego di questa tecnologia ha permesso di eseguire l'intera opera senza minimamente intaccare gli argini e l'alveo del corso d'acqua, né tantomeno ostacolare la navigazione fluviale ove presente. Si può inoltre affermare che non si sono provocati disturbi ambientali permanenti e che nel contempo i disturbi ambientali temporanei sono stati di modesta entità, contenuti nelle aree relative alle postazioni e alla prefabbricazione della condotta. Ancora una volta la scelta effettuata, a seguito di accurati studi effettuati in collaborazione con Snamprogetti e Aquater (società del Gruppo ENI), si è dimostrata all'altezza delle problematiche da affrontare e risolvere. Parimenti la gestione del cantiere da parte di Snamprogetti, ha rappresentato un importante e qualificato punto di riferimento per tutte le parti coinvolte nei lavori: Committente, Appaltatori e Subappaltatori.

DATI COMPARATIVI

	FIUME PO		FIUME ADIGE	
	SCAVO A CIELO APERTO	PERFORAZIONE CON MICROTUNNELLING	SCAVO A CIELO APERTO	PERFORAZIONE CON MICROTUNNELLING
TERRENO DA MOVIMENTARE	circa 500.000 m^3	circa 10.000 m^3	circa 100.000 m^3	circa 8.000 m^3
LUNGHEZZA ATTRAVERSAMENTO	circa 1600 m	circa 860 m	circa 500 m	circa 570 m
PIOPPI DA ABBATTERE	circa 1000	nessuno	nessuno	nessuno
INTRALCIO ALLA NAVIGAZIONE	rilevante	nessuno	rilevante	nessuno
DANNI AMBIENTALI PERMANENTI	trascurabili	irrilevanti	trascurabili	irrilevanti
DANNI AMBIENTALI TEMPORANEI	rilevanti	trascurabili	rilevanti	trascurabili

Un particolare ringraziamento per la collaborazione al geom. Gosetto (Snamprogetti) e al geom. De Lorenzo (Snam).

zione consentiva un riduzione del tracciato di circa 300 m anche per il fiume Adige.
Dall'esame dei dati derivanti dagli studi di fattibilità ed in funzione del profilo degli attraversamenti e delle caratteristiche meccaniche della condotta in acciaio DN 1200 mm, furono prese in considerazione entrambe le tecniche da noi utilizzate:

- la Trivellazione Orizzontale Controllata (TOC);
- il Microtunnelling rettilineo o curvilineo.

Per quanto riguarda la TOC, la presenza dei livelli limosi e argillosi avrebbe dato sufficienti garanzie di successo mentre la presenza di sabbie per buona parte degli attraversamenti avrebbe lasciato aperta l'eventualità del collasso del foro stesso durante le fasi di alesaggio e varo della condotta, in funzione anche della rilevante lunghezza delle perforazioni (circa 850 e 650 m). Le dimensioni della condotta in acciaio (DN 1200 mm) avrebbero comportato infatti la realizzazione di un foro di almeno 1500 mm di diametro all'interno del quale posare la condotta.
La metodologia del microtunnelling rettilineo, che prevedeva la messa in opera di un tubazione di rivestimento man mano che veniva realizzata la perforazione, consentiva di escludere la possibilità di collasso del foro in fase di esecuzione dei lavori. Tale metodologia poteva presentare inconvenienti legati alle profondità delle postazioni di spinta e ricevimento che comunque potevano essere previsti in anticipo ed ovviati progettando l'impianto di scavo e le tubazioni di rivestimento in funzione delle reali problematiche operative.
La scelta di realizzare microtunnel curvilinei eliminava definitivamente anche queste problematiche. Verificata la disponibilità delle competenti Autorità Idrauliche a consentire l'impiego di questa tecnologia, che per la prima volta sarebbe stata utilizzata in Italia con profilo curvilineo, e recepite le prescrizioni di sicurezza relative alla salvaguardia degli argini, si poteva procedere alla stesura del progetto di massima degli attraversamenti. Tenendo conto anche che il tracciato prescelto per il fiume Po incrociava, in mezzo al fiume, l'esistente metanodotto e che pertanto la perforazione doveva essere mantenuta a debita distanza di sicurezza.

Scelta delle attrezzature - Dati di progetto - Prescrizioni

Nella scelta delle attrezzature di scavo e nella preparazione del progetto esecutivo si dovevano rispettare i dati di progetto e le seguenti prescrizioni:

- esecuzione dello scavo per mezzo di una fresa scudata a piena sezione con bilanciamento della pressione sul fronte di scavo, a controllo remoto e con controllo della direzione di avanzamento in continuo mediante laser; dimensionamento delle attrezzature tenendo conto del massimo battente idrico teorico di 45 m, calcolato fra la sommità arginale e il fondo scavo per il fiume Po;
- realizzazione delle postazioni di spinta e di arrivo a perfetta tenuta idraulica, con messa in opera di diaframmi perimetrali e soletta di base in c.a.;
- dimensionamento di elementi tubolari di rivestimento in cemento armato centrifugato; ogni elemento tubolare deve essere provvisto di tre valvole a sfera che consentano la lubrificazione/intasamento dell'intercapedine fra i tubi e il terreno; i giunti devono essere a bicchiere e garantire la perfetta tenuta idraulica e un'omogenea distribuzione degli sforzi di spinta su tutta la circonferenza;
- prevedere l'uso di stazioni di spinta intermedie da installare, in funzione delle esigenze operative, ogni circa 80÷100 m;
- intasare, accuratamente con apposita miscela, l'intercapedine fra la parete esterna degli elementi tubolari in c.a. ed il terreno;
- intasare completamente l'intercapedine fra la condotta e i servizi installati nel microtunnel e la parete in c.a. dello stesso, con opportune miscele cementizie additivate a bassa resistenza meccanica;
- prevedere per il solo fiume Po l'esecuzione di iniezioni di consolidamento presso l'unghia interna dei due corpi arginali, come previsto dai disegni di progetto.

DATI DI PROGETTO

DENOMINAZIONE	FIUME PO	FIUME ADIGE
DIAMETRO NOMINALE CONDOTTA	1200 mm	1200 mm
RAGGIO ELASTICO CONDOTTA	1200 m	1200 m
LUNGHEZZA ATTRAVERSAMENTO	864 m	570 m
DISTANZA POSTAZIONE DAGLI ARGINI	dx. 75 m sin. 105 m	dx. 107 m sin. 135 m
PROFONDITÀ A PIEDE ARGINE	14 m	15 m
PROFONDITÀ IN ALVEO	25 m	15 m
DIAMETRO INTERNO TUNNEL	2000-2400 mm	2000-2400 mm
COLLARI DISTANZIATORI	malta poliuretanica	malta poliuretanica
ACCIAIO	API 5L-X 65	API 5L-X 65
SPESSORI	16,1-18,9-25,9 mm	16,1-18,9-25,9 mm

Progettazione, scavo e montaggio condotte

S. Zannier (ENERECO S.C. a R.L.)
N. Baak (LUDWIG FREYTAG GmbH)
S. Montecalvo, G. Gallingani (TRECOLLI Spa)

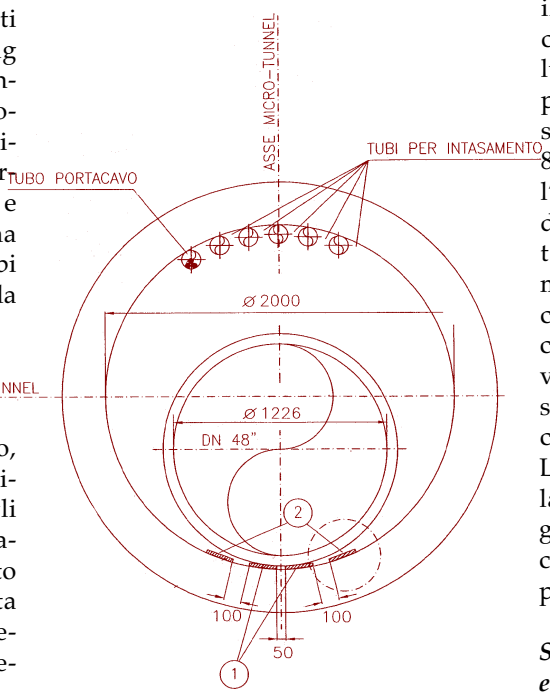
La progettazione esecutiva

Sulla base del progetto e dei requisiti forniti da SNAM, l'impresa Ludwig Freytag ha effettuato una serie di sondaggi geognostici in golena e al di fuori degli argini dei due fiumi individuando le tipologie geologiche dei terreni da attraversare (strati di argilla e sabbia), sulla base di questi dati ha stabilito il diametro e lo spessore dei tubi camicia in calcestruzzo armato e della unità di perforazione da utilizzare.

I microtunnel

Si è studiato il tracciato in dettaglio, rispettando le profondità minime richieste dal Committente, sia sotto gli argini che in alveo. Un raggio di curvatura unidirezionale di 2000 m è stato ritenuto adatto a garantire la tenuta stagna dei giunti tra un anello di calcestruzzo e l'altro, a garantire un'adeguata ripartizione della spinta.
La forza necessaria a spingere la colonna di anelli in calcestruzzo da una parte all'altra dei fiumi si è da subito dimostrata elevata ed eccessiva per un apparato spingente da sole 1400 t: si è così deciso di introdurre delle stazioni intermedie di spinta, ciascuna da 1000 t, per consentire un avanzamento cosiddetto «a lombrico» della colonna di anelli.
Il numero di tali stazioni intermedie era stato valutato ipotizzando a tavolino, sulla base di esperienze precedenti, un azione tangenziale tra calcestruzzo e terreno attraversato di 10 kN/m². Ne era risultato che le stazioni intermedie di spinta dovevano essere posizionate almeno una ogni 120 m, e cioè una ogni 40 anelli camicia, fatto salvo il rilievo di maggiori attriti in fase di esecuzione. Perciò erano state previste 4 stazioni di spinta intermedie per il fiume Adige e 6 per il Po.
Si era poi verificata tutta la disposizione logistica delle aree di cantiere per il posizionamento delle attrezzature e dei mezzi necessari a eseguire i lavori, quali ad esempio: area deposito tubi in calcestruzzo armato, gru, impianto di separazione, vasca di decantazione fanghi, centrifuga, pozzo di spinta, sala controllo, compressore, contenitore/miscelatore della bentonite, riserva d'acqua, separatore di sabbia, bacino di decantazione, gruppo elettrogeno, box uffici, locale mensa, servizi igienici, magazzini, ecc. Un sistema di rilevamento laser multistazione avrebbe poi monitorato la perfetta aderenza dell'attraversamento al tracciato di progetto ed eventualmente un operatore dalla sala controllo avrebbe coordinato tutte le correzioni necessarie.

Sezione trasversale del microtunnel



Fiume Adige. Varo della condotta in notturna

I montaggi meccanici

Una volta risolti i problemi tecnici di dimensionamento e organizzativi relativi alla parte di microtunnelling, e quindi nell'ipotesi di avere completato il corridoio curvilineo di anelli in calcestruzzo, la Freytag era passata a valutare le forze necessarie a trascinare, per l'intera lunghezza degli attraversamenti, le stringhe di 48" del peso di 800 kg/m, per un totale di 476 ton per l'Adige e di 688 per l'attraversamento del Po. L'impresa Tre Colli subappaltatrice dei lavori civili e di montaggio meccanico e la società Enereco S.C.ar.l., che ha fornito tutto il supporto tecnico-ingegneristico relativo alla pista di varo, hanno affiancato la società tedesca nella compilazione di tutta la procedura per il montaggio meccanico.
Le problematiche riscontrate durante la progettazione, per garantire che l'ingresso del tubo procedesse senza ostacoli e a regola d'arte, sono state molteplici.

Studi delle catenarie di varo e della pista

Il raggio di curvatura minimo, pari a 850 m, richiesto dal Committente per la movimentazione del tubo e l'estrema rigidità del tubo stesso, a spessore rinforzato di 25,9 mm, aveva fatto sì che l'angolo di inserimento nel terreno dei microtunnel fosse determinante per la preparazione della pista di varo con banchina in rilevato all'Adige e in scavo al Po.
Attraverso un modello agli elementi finiti realizzato con AutoPIPE 6.00 si è simulata l'esatta configurazione della

catenaria di varo, tenendo conto di fattori come: l'inclinazione iniziale del microtunnel, il raggio minimo di curvatura, il numero e tipo di mezzi di sollevamento messi a disposizione da Tre Colli, la rigidezza intrinseca del tubo in acciaio funzione del suo modulo elastico, garantendo così che in nessun punto il tubo potesse superare lo stato tensionale di sicurezza richiesto. Tale catenaria, insieme all'esatta distribuzione dei pesi, funzione del numero dei mezzi di sollevamento e delle loro caratteristiche meccaniche, geometriche e di portata, ha poi portato alla definizione della pista di varo. La sagomatura completa della pista di varo è stata poi verificata per ogni possibile condizione di utilizzo, dalla movimentazione per l'avvicinamento al pozzo, al momento dell'ingresso del tubo nel microtunnel.
Per poter rispettare costantemente il raggio di curvatura minimo prescritto (R = 850 m), nel corso del sollevamento, spostamento e varo della condotta, si è pensato di predisporre dei pali per tutta la lunghezza della stringa, di opportuno interasse e opportunamente quotati in altezza, per consentire un continuo controllo visivo sia da parte dell'operatore che del coordinatore unico delle operazioni.
Il sicuro transito delle stringhe di tubo e dei mezzi di sollevamento doveva essere garantito da una costruzione della carreggiata, adeguatamente compressa e livellata, realizzata con materiale ghiaioso a diversa granulometria.
L'angolo di inserimento nel terreno del microtunnel all'Adige era di 8°, mentre l'angolo al Po di soli 5°: questi pochi gradi di differenza hanno generato due piste di varo molto diverse tra loro, anche se le problematiche tecniche erano simili dal punto di vista operativo. Una pista è risultata in rilevato di ben 4 m, con il tubo che raggiungeva i 9 m dal piano di campagna, l'altra completamente in scavo, con il tubo che rimaneva a poca distanza da terra.

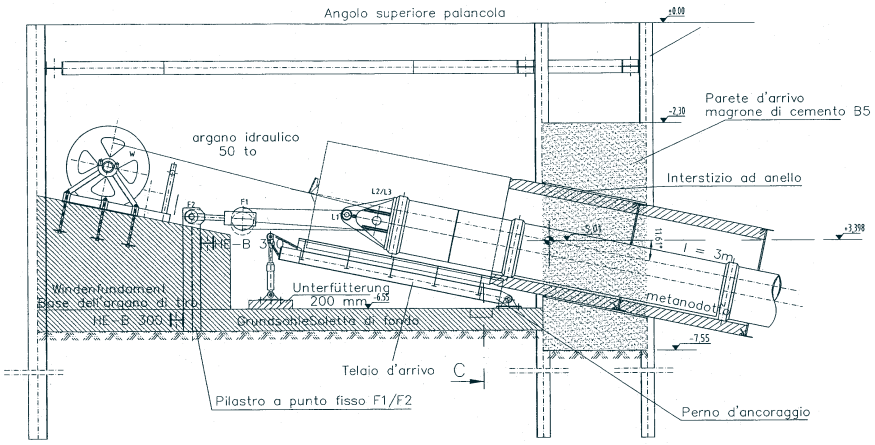
Collari distanziatori

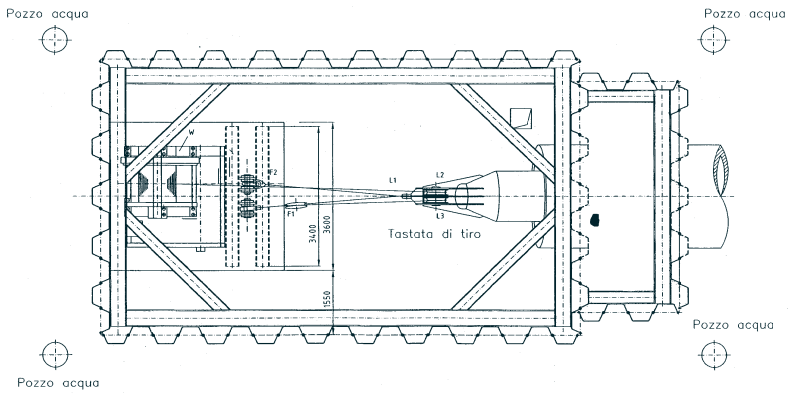
Al tubo di linea, anche se dotato di un robusto rivestimento, non poteva essere permesso di strisciare direttamente a contatto con il cemento, pena l'abrasione completa dello strato isolante destinato a proteggerlo catodicamente. Perciò il Committente aveva proposto la realizzazione di speciali collari distanziatori, a forma di toro trapezoidale, di altezza pari a 6 cm, realizzati con un materiale composto molto resistente (Marin Block) in grado di sopportare le sollecitazioni di abrasione del calcestruzzo. Il materiale utilizzato per questi collari distanziatori era una resina poliuretanica generata dalla miscela a freddo di due componenti, la cui interazione porta ad avere in pochi minuti un materiale durissimo e perfettamente aderente al tubo. Tali collari dovevano essere realizzati direttamente sopra il rivestimento, precedentemente irruvidito, del tubo di linea per l'intero sviluppo dell'attraversamento a un interasse di 5 m. L'interasse prescelto aveva messo la condotta al sicuro sia da eventuali rotture dei collari in fase di varo sia dal disallineamento, dovuto alla non perfetta linearità tra barra e barra, del tubo, in quanto la resistenza del materiale era tale da consentire campate anche tre volte più lunghe dell'interasse prestabilito.

▲Fiume Po. Postazione di spinta in allestimento

Attrito tra collari e soletta in calcestruzzo

Senza dubbio, il problema dell'attrito tra tubo e pavimento di anelli di calcestruzzo è stato uno dei più importanti e delicati problemi affrontati dalla Ludwig Freytag per garantire la fattibilità del montaggio meccanico affidato all'impresa Tre Colli, problema maggiormente esaltato dalla decisione della ditta tedesca di utilizzare un proprio argano a tamburo della potenza massima di 50 t.
Dato che il marin-block per tubi di grosso diametro è stato sperimentato solo poche volte, la Ludwig Freytag ha deciso di effettuare una prova in situ per valutare l'attrito collare-soletta, l'aderenza dei collari al rivestimento e per capire in che misura i collari si sarebbero consumati nell'ipotesi che avessero strisciato direttamente e a secco sul calcestruzzo.
Si è utilizzata una barra del tubo di linea su cui era già applicato un collare, è stata appesantita ed equilibrata in modo che il peso fosse scaricato solo sul collare e il tutto è stato trainato per 600 m. Il risultato di tale esperimento è stato una perfetta adesione collare-rivestimento, un attrito tra collare e cemento pari a 0,9 ed un consumo di 3 cm sui 6 cm dell'altezza del collare: un risultato giudicato, attrito a parte, soddisfacente. Per garantire l'ingresso della condotta non si poteva certamente utilizzare il valore dell'attrito riscontrato dall'esperimento. Infatti, si rendeva necessario sviluppare al Po una forza traente minima di F = 0,9 x P tubo/m x L attraversamento = 620 t.
Con l'argano a disposizione, tale forza era raggiungibile effettuando dodici rinvii. La soluzione di effettuare dodici rinvii era stata subito scartata, in quanto si voleva trainare le stringhe da 100 m senza interruzioni. Senza contare, inoltre, che ci sarebbe voluta una quantità enorme di cavo di notevole spessore e sarebbe occorsa una complessa logistica di pulegge, nonché l'interferenza di tutti quei cavi con il soffitto del microtunnel dove dovevano essere installati i tubi per l'intasamento finale.
Presso un laboratorio della propria sede la Freytag eseguì una serie di prove sperimentali, al fine di valutare quale tecnica di riduzione dell'attrito potesse essere adottabile.
Utilizzando un tronco di tubo, lo si era appesantito opportunamente e lo si era inserito dentro un anello di calcestruzzo fortemente ancorato. Effettuando delle semplici misurazioni sulla forza traente necessaria a spostare il tubo





all'interno dell'anello, si era riusciti, dopo numerosi test, ad ottenere per via sperimentale gli attriti in *Tabella A*.
Il desiderio di avvalersi del numero minimo possibile di rinvii ha fatto ricadere la scelta sull'utilizzo della tecnica che consentiva il minimo attrito al minor costo, ovvero binari di PE 500 lubrificati con grasso biodegradabile e difficilmente spiazzabile dal passaggio per centinaia di metri dei collari distanziatori.
La tecnica prevedeva il fissaggio di quattro strisce, di dimensioni 16x2x600 cm^3 di PE 500, distanti tra loro 10 cm, direttamente sul pavimento degli anelli in calcestruzzo, tramite viti ad espansione disposte a una distanza di 90 cm.

TABELLA A

Tipo di superficie di scorrimento	Attrito statico medio	Attrito dinamico (radente) medio	Note
Calcestruzzo asciutto	0,90	0,74	Abrasione collare
Calcestruzzo lubrific. con grasso biologico	0,56	0,52	Abrasione collare
PVC asciutto	0,30	0,30	Rottura PVC
PVC lubrificato con grasso biologico	0,20	0,15	-
PVC con lubrificante grafitato	0,10	0,05	-
PVC e bentonite	0,16	0,06	Incrinatura PVC
Acciaio lubrificato con grasso biologico	0,15	0,08	-
Acciaio con lubrificante grafitato	0,10	0,05	-
Acciaio lubrificato con Biogrease	0,30	0,16	-
PE 1000 semplicemente pulito	0,14	0,12	-
PE 1000 lubrificato con Biogrease	0,11	0,06	-
PE 500 lubrificato con Biogrease	0,20	0,10	-

Progettazione del traino

Sulla base delle prove sperimentali di attrito si era studiato, con opportuni coefficienti di sicurezza, tutto il sistema dei rinvii, la lunghezza e la dimensione dei cavi, il dimensionamento della testa di tiro, la deformata del cavo di traino (per verificare eventuali interferenze con il soffitto del microtunnel), il basamento dell'argano e tutte le opere civili correlate.
La testa di tiro prevedeva l'alloggio di due pulegge e di un punto fisso a cui agganciare il capo corda. La sagoma dell'intero sistema di perni e pulegge non usciva dalla circonferenza del tubo.
Il tiro massimo di progetto per la testa di tiro era stato calcolato in funzione dell'attrito e pari a 250 t.
Per motivi logistici e pratici, per la movimentazione dei tubi si è deciso di creare all'Adige sei colonne della lunghezza media di 100 m, mentre al Po sette stringhe di lunghezza variabile tra 98 e 148 m. Le colonne sarebbero poi state saldate l'una all'altra man mano che il tubo veniva infilato.
Il traino, simile sia per il Po che per l'Adige, prevedeva che al tiro diretto (50 t max) della prima colonna si sarebbero aumentati successivamente i rinvii [F = 50 t x (no. Rinvii+1)] man mano che si rendeva necessario aumentare il tiro. In tal modo si poteva economizzare sulla quantità di cavo necessaria, con l'unica precauzione che ogni rinvio doveva essere anticipato durante le ore di saldatura tra una colonna e l'altra. Il cavo di cui era dotato l'argano era da 36 mm di diametro e pesava circa 5,4 kg/m. Per l'impossibilità di movimentarlo a mano, la Ludwig Freytag si è servita di un altro argano di servizio da 10 t per eseguire i vari rinvii. Per permettere al personale di lavorare in sicurezza e per bloccare il tubo in una posizione predeterminata per la saldatura era stata progettata, nella parte terminale di ogni colonna, una clampa di arresto che, perfettamente ammorsata al tubo, sarebbe andata a contrasto con l'ingresso del microtunnel e avrebbe impedito un qualunque movimento del tubo fino alla sua rimozione per l'ingresso successivo. Tra un tiro e l'altro, alcuni uomini avrebbero dovuto entrare nei microtunnel e, partendo dalla testa di tiro, lubrificare a ritroso la superficie del pavimento, di lunghezza pari alla nuo-

va colonna da infilare. Tale operazione era prevista a tratti, sia per permettere la realizzazione dei rinvii successivi senza pericolo di scivolamenti, sia per effettuare un controllo visivo dei collari all'interno del microtunnel.
Durante l'ingresso del tubo, la lubrificazione doveva essere applicata tramite spazzole su tutti i collari, man mano che questi entravano nei microtunnel. Mentre il tubo procedeva, i mezzi di sollevamento dovevano avanzare e assecondarne i movimenti, sempre traguardando la posizione di catenaria.
Tutto ciò che era stato progettato per il varo è stato riassunto in una procedura, sottoposta ad approvazione del Committente, contenente passo passo tutte le operazioni ritenute necessarie al varo, nonché tutti i calcoli e i certificati di idoneità delle attrezzature e materiali utilizzati. In particolare, si è puntato molto a ridurre i rischi per il personale, si è nominato un unico Capo varo e si sono tenute una serie di riunioni di formazione col personale sia tedesco che italiano.

Tubi in c.a. (2000x2500), completi di tre valvole di iniezione e tre guarnizioni di tenuta (due anteriori ed una posteriore).
Nel particolare tavola in legno per la distribuzione dei carichi

Esecuzione lavori

Microtunnelling

Una volta arrivato in Italia il gruppo tedesco si è avvalso da subito dell'aiuto di un interprete, che ha seguito tutti i rapporti con i fornitori italiani e la committenza, permettendo un rapido inizio dei lavori, iniziando dal fiume Adige.

Fiume Adige. Stazione di spinta: Fase di spinta di un elemento tubolare in c.a.

Fiume Adige. Stazione di spinta: completata la spinta di un elemento tubolare in c.a.; carrello in fase di arretramento.

Inizialmente si sono eseguiti tutti i rilievi topografici delle aree interessate all'intervento e si è segnalato tutto il tracciato fino ai limiti di batteria. L'impresa successivamente ha effettuato lo scotico accantonando l'humus e creato le vie d'accesso necessarie all'area di lavoro, utilizzando geotessili nell'interfaccia strada-terreno e materiale a granulometria variata.
Una volta determinato il punto esatto dell'inserimento del tubo nel terreno, si è delimitata l'area del pozzo di spinta e sono state vibro-infisse delle palancole della lunghezza di 12 m, creando un pozzo di forma rettangolare delle dimensioni in pianta di 12 m x 6 m e profondo 6,5 m. Secondo i disegni di progetto, l'imbocco del microtunnel partiva a quota -4.30 all'Adige e a quota -5.04 m al Po, rispetto al piano di campagna. Man mano che si asportava il terreno all'interno del pozzo, per impedirne l'implosione è stato disposto un telaio in acciaio alla sommità del palancolato. Infine, una volta raggiunta la quota finale, è stata gettata la soletta di fondo e il consistente muro in cemento armato, capace di contrastare la forza di 1400 t dei martinetti di spinta. Successivamente si sono disposte tutte le apparecchiature di cantiere, tra cui ricordiamo: gru, impianto di separazione, vasca di decantazione fanghi, centrifuga, sala controllo, compressore, contenitore/miscelatore della bentonite, riserva d'acqua, separatore di sabbia, bacino di decantazione, gruppo elettrogeno, area deposito tubi in calcestruzzo armato. Prima della preparazione completa del pozzo di spinta si è bonificata la parete del palancolato lato fiume per impedire che al momento del taglio delle palancole, per inserire la macchina di perforazione, si verificasse il sifonamento dell'acqua di falda.
Durante la preparazione del pozzo di spinta si sono succedute le seguenti fasi.
1) Il carrello di spinta è stato trasportato sotto forma di singoli elementi e

Fiume Adige. Stazione di spinta: inserimento di un nuovo elemento tubolare in c.a.

L'unità di perforazione

AVN 2000 D con scudo misto

La AVN 2000 D è stata attrezzata con uno scudo misto in grado di garantire la sicurezza del lavoro anche in presenza di particolari condizioni geologiche instabili dovute a terreni talvolta incoerenti.

La camera di scavo sulla testa della macchina viene completamente riempita di una sospensione di bentonite, mentre la sospensione nella camera a pressione, dietro la parete immersa, viene sostenuta da un cuscinetto d'aria compressa. La pressione viene controllata automaticamente grazie ad un impianto di regolazione, in modo da impedire fuoriuscite incontrollate. Il grado di precisione dell'equilibrio tra pressione e contropressione è stato regolato sullo 0.

La valvola di comunicazione garantisce l'equilibrio della pressione tra la camera di estrazione e la sospensione della camera ad aria compressa dietro la parete di immersione. L'iniezione della miscela avviene direttamente nella camera di estrazione attraverso un tubo di alimentazione. L'aspirazione della sospensione avviene direttamente sulla griglia di presa mediante apposita tubazione.

La formazione del deposito di sedimenti sotto la valvola di comunicazione viene evitata grazie all'azione di lavaggio a intervalli tramite il tubo di alimentazione della camera e la linea di convogliamento.

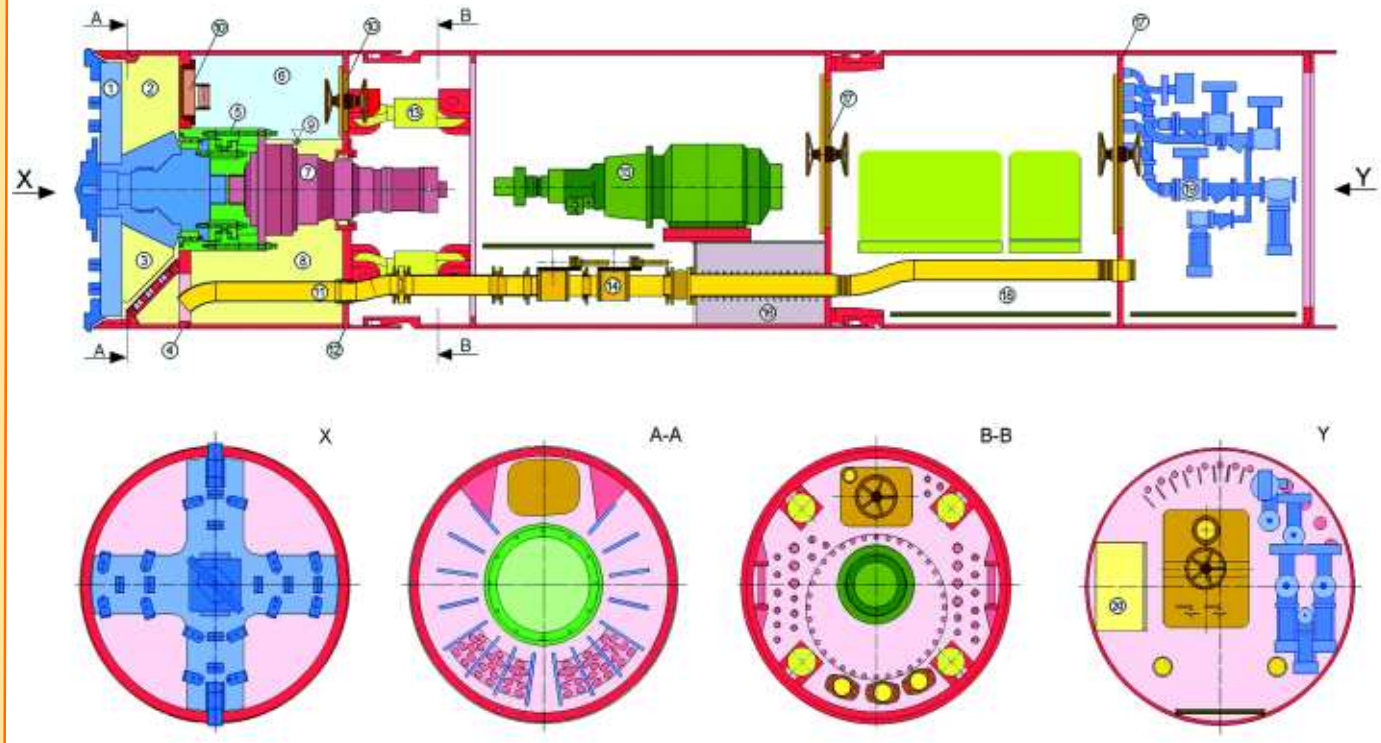
Questa tecnica si è rivelata particolarmente valida negli attraversamenti di fiumi, consentendo un ottimo controllo delle pressioni.

La AVN 2000 D è inoltre dotata di un dispositivo a forma conica per la frantumazione di eventuali sassi. I sassi, di dimensioni fino a 60 cm, vengono frantumati e ridotti in granelli che si estraggono idraulicamente. La AVN 2000 D dispone, nella sua parte posteriore, di una stazione integrata con una capacità di 680 tonnellate di spinta.

Lubrificazione con bentonite

L'ingombro della macchina ha un diametro che supera di 40 mm quello del tubo, nel caso specifico 2.500 mm. Questo spazio circolare viene continuamente riempito con bentonite ad alta viscosità o da una sospensione a base di polimeri. Ciò avviene, sia per ridurre l'attrito tra

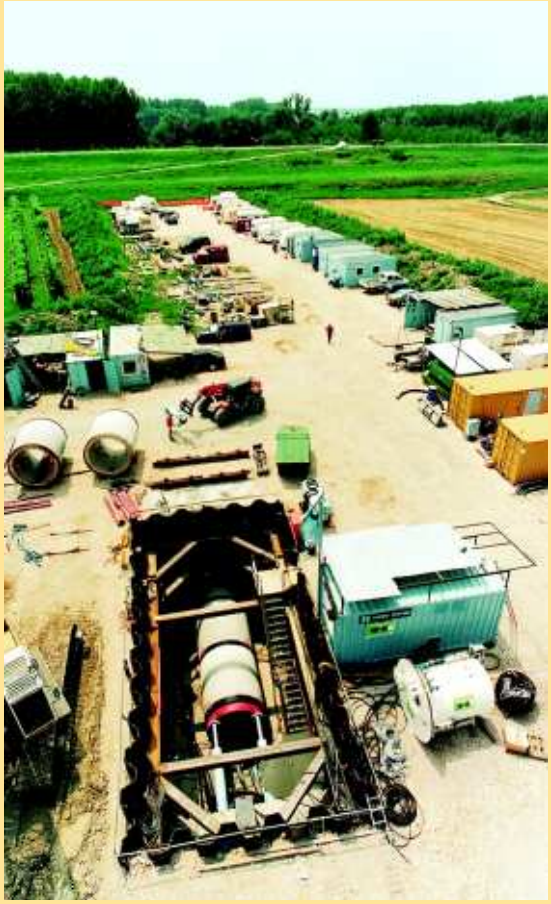
1. Ruota fresante
2. Camera di miscelazione
3. Frantoio conico
4. Paratia
5. Cuscinetto principale
6. Cuscino d'aria
7. Trasmissione principale
8. Camera fluido bentonitico
9. Livello fluido bentonitico
10. Portello d'accesso
11. Linea di ritorno fluido di smarino
12. Paratia stagna
13. Martinetti guida
14. Valvola di by-pass
15. Pompa idraulica principale
16. Serbatoio olio idraulico
17. Accesso alla camera iperbarica
18. Camera iperbarica
19. Sistema di controllo e regolazione aria compressa
20. Quadro elettrico



tubo e terreno che per assicurare che le fessure siano chiuse in modo sicuro.
Nel sistema le stazioni di lubrificazione a guida pneumatica rifornite di bentonite sono complessivamente 34, ciascuna con 3 valvole di lubrificazione poste a 120 gradi l'una dall'altra. La consistenza, la frequenza temporale e la quantità della lubrificazione sono misurate con un sistema computerizzato e adeguate di volta in volta alle condizioni operative (per es. carichi longitudinali tra le stazioni intermedie o formazioni incontrate). Tutte le stazioni sono protette dalla penetrazione di agenti esterni grazie ad una valvola di non ritorno. Quanto sopra descritto serve ad impedire ogni infiltrazione d' acqua tra terreno e tubo.

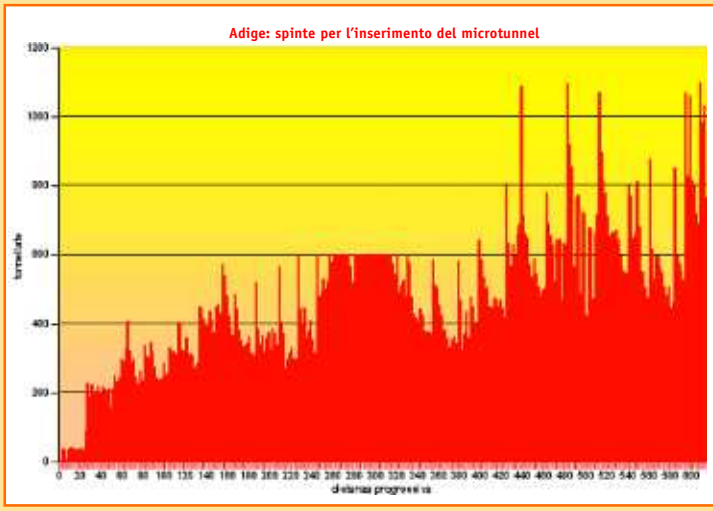
Stazioni intermedie di spinta

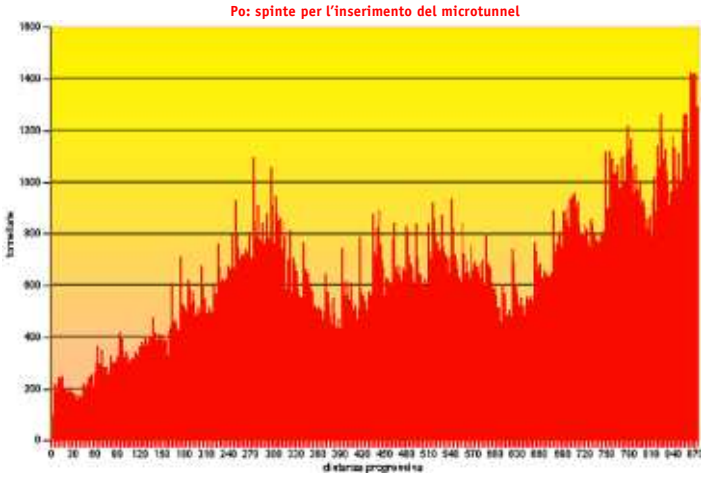
Hanno una forza di spinta pari a 1000 t, sono costituite da martinetti idraulici sincronizzati tra di loro. Ipotizzando un attrito di μ = 10 KN/m^2 la massima lunghezza di spinta raggiungibile con una stazione intermedia risulta tra 120 e 150 m, per l'attraversamento del fiume Adige, sono previste 3-4 stazioni intermedie. Per l'attraversamento del Po ne sono previste complessivamente 6-7.
Il reale posizionamento delle stazioni sarà chiaramente determinato durante la fase di trivellazione in base alle pressioni presenti.



Rilevamenti

In base all'esperienza nel caso di attraversamenti sotterranei, è bene procedere con raggi unidirezionali R = 2.500 m circa. Di conseguenza, a causa della curvatura, il semplice rilevamento tramite laser e schermo direzionale è possibile solo nella fase iniziale. Si è prevista quindi l'installazione di un cosiddetto sistema laser progressivo e di accompagnamento posto a 50 m dallo schermo direzionale elettrico ELS.
Questa stazione laser SLS, montata su un treppiede a sostegno elettronico automatico, è orientata verso un'ulteriore schermo direzionale di riferimento che si trova alla fine del tunnel ed è così in grado di fornire all'operatore della macchina tutti i dati esatti sull'andamento del tunnel in ogni momento. Tutti i dati relativi alla spinta vengono continuamente monitorati e memorizzati.





montato in opera;
2) Con l´ausilio dei sostegni regolabili è stata inclinata la rotaia in modo che l'angolo verticale di inclinazione e la direzione dell'asse di spinta coincidessero perfettamente, onde far incontrare al tubo una superficie d'appoggio perfettamente piana al momento dell'inserimento. Nella testa di spinta si doveva necessariamente avere un perfetto parallelismo tra le superfici per evitare danni ai tubi di spinta dovuti ad una errata distribuzione delle forze.

▲ Fiume Po. Impianto di riciclo fanghi

3) Fissato quindi il carrello nel pozzo con l'ausilio di sostegni assiali si è verificato che gli stessi fossero montati uniformemente, altrimenti sarebbero subentrate delle sollecitazioni indesiderate nelle rotaie, con conseguente deformazione delle stesse.
4) Dopo aver installato il carrello nel pozzo, è stata fatta una gettata, con malta a presa rapida, nella fessura tra la piastra di spalla ed la parete del pozzo. Con la gettata di malta a presa rapida si è completata l'installazione della piastra di sostegno. Questo ha provocato un passaggio ottimale delle forze dal pozzo verso il terreno e ha impedito eventuali danni alla parete del pozzo. È stato di fondamentale importanza che tra rotaie e piastra reggispinta si sia mantenuto un angolo retto, onde garantire un perfetto scorrimento del carrello.
L'Allacciamento del carrello di spinta, Allacciamento tastiera di comandi per il pozzo, Allacciamento dei martinetti principali, Messa in funzione del carrello, Entrata e uscita dei martinetti, sono stati eseguiti in accordo alla documentazione fornita dal costruttore.

▲ Stazione di spinta intermedia, martinetti predisposti all'interno

L'avanzamento del tunnel, costituito da un insieme di tubi in cemento armato, è avvenuto a partire dal pozzo di partenza con l'ausilio di un rivestimento idraulico sostenuto da bentonite. Le rotaie del carrello, dopo il passaggio di ogni tubo, sono state prima pulite e poi cosparse di grasso. L'attrito tra i tubi ed il terreno circostante è stato ridotto da una sospensione di bentonite. Ogni tre tubi sono stati predisposti dei nipples con i quali è stato possibile regolare la pressione della bentonite all'esterno del microtunnel.
I tubi camicia erano costituiti da un anello in calcestruzzo armato, di diametro interno di 200 cm, dello spessore di 25 cm e con una lunghezza di 3 m; avevano un unico verso di inserimento a monte del quale un cerchiaggio esterno di metallo faceva da invito al tubo camicia successivo che si innestava facilmente. A fare da cuscino e ripartitore degli sforzi tra un tubo camicia e l'altro era alloggiata una struttura in legno a forma di corona circolare, dello spessore di 2 cm. Esternamente al tubo camicia, dei punti di presa baricentrici permettevano l'imbragatura, il trasporto e l'alloggiamento finale sui binari di inserimento tramite gru. Inoltre, a ca. 100 m l'una dall'altra sono state allestite delle stazioni intermedie di spinta, che hanno contribuito all'avanzamento del tunnel. Nella macchina DN 2500 la massima pressione raggiungibile sullo scudo era di 5 bar = 500 kN/m². Nelle condizioni di terreno riscontrate questa pressione è stata sufficiente per controbilanciare il peso del terreno di scavo sotto massimo sforzo. Sui tubi del tunnel, dove sono stati disposti una serie di nipples per l´immissione della bentonite all'esterno del microtunnel, la pressione massima garantita era di 40 bar. Anche in caso di perdita di pressione, intorno o dentro la conduttura, pari a $\Delta p \approx 3$ bar/100 m, la pressione della bentonite era sufficiente a compensare uno scarto di pressione tra livello massimo dell'Adige/Po e il livello della falda pari a $\Delta p \approx 1{,}5$ bar. Anche il pericolo di circolazione d´acqua nella zona del foro, con il conseguente rischio per gli argini, è stato eliminato, qualora durante la perforazione si fossero incontrati e/o creati dei percorsi preferenziali che potevano fungere da collegamento tra l'Adige/Po e il foro di perforazione.

▼ Fiume Po. Inserimento di una stazione intermedia all'interno del microtunnel

La necessità di irrorare di bentonite a pressione lo spazio alle spalle dell'unità di perforazione era dovuto al fatto che il terreno attraversato non aveva grandi proprietà meccaniche in grado di conservare tutta l'ampiezza dello scavo e sarebbe sicuramente franato sui tubi in calcestruzzo, dal momento che la macchina di perforazione aveva un diametro esterno di qualche cm più grande degli anelli camicia che la seguivano.
Riassumendo, le operazioni principali prima di avviare l'unità di perforazione sono:

- Portare il container in prossimità del

pozzo.
• Mettere a terra il container e collegarlo.
• Predisporre la vasca di decantazione.
• Predisporre la consolle e la protezione del laser.
• Direzionare esattamente il laser (altezza, direzione, inclinazione).
• Tracciare la direzione della guarnizione di perforazione e suo montaggio.
• Allestire e orientare il carrello di spinta in base al laser.
• Fare una gettata di malta a presa rapida nel carrello di spinta tra piastra di spalla e la parete del pozzo.
• Montare le pompe di alimentazione e di trasporto.
• Installare il circuito idrico.
• Infilare la macchina dentro il carrello di spinta e provvedere all'allacciamento.
• Provare tutte le funzioni della macchina.
• Memorizzare la correzione per i rilevamenti.
• Avviamento.

Durante tutta la fase di trivellazione sia all'Adige che poi al Po non si sono verificati problemi di rilievo. L'unico inconveniente è avvenuto al Po dove alcuni sondaggi geognostici indicavano sabbia è stata rinvenuta dell'argilla mediamente addensata. Questo contrattempo ha portato ad un rallentamento dell'avanzamento, 1-3 tubi/gg, e ad un progressivo intasamento del circuito dell'acqua a causa della grande quantità di materiale argilloso in sospensione. Si sono presi degli accorgimenti come l'inserimento di una centrifuga messa in serie ai gruppi di separazione dei fanghi che venivano impiegati per depurare le acque provenienti dall'unità di perforazione. Per ridurre la densità di sospensione nell'acqua è stata introdotta nel circuito anche della soda, ma la sua funzione di aggregante per l'argilla, sebbene migliorativa, non ha portato i risultati sperati. Fortunatamente lo strato di argilla è risultato essere lungo solamente una novantina di metri, e ben presto tutto il sistema è tornato alla normalità.
L'avanzamento giornaliero del microtunnel era piuttosto variabile; spesso condizionato dalla tipologia dei terreni attraversati, a volte rallentato da operazioni di manutenzione o dall'introduzione delle stazioni intermedie. Ciò nonostante, la velocità media si è attestata a circa 17 m/giorno, con punte anche di 30 m con turni lavorativi di 12 ore/gg in media.
L'avanzamento (2,5-4 cm/min) della colonna di anelli in calcestruzzo appariva impercettibile, data l'estrema lentezza dell'operazione. La sensazione dell'avanzamento si aveva solo quando il martinetto arretrava per lasciare spazio al nuovo anello che la gru calava alle spalle di quello infilato.
Per eseguire tutti i rilevamenti direzionali è stato utilizzato un apparecchio laser. Data la configurazione curvilinea del microtunnel è prevista l'installazione di un cosiddetto sistema laser progressivo o di accompagnamento.

▲ Interno del tunnel. In primo piano strumentazione laser per il controllo direzionale

▲ Interno del tunnel. In primo piano si notano i riflessi dati dai prismi per il controllo direzionale laser

Il sistema di navigazione opera con un ELS (sitema elettronico laser) che utilizzando un raggio laser è in grado di rilevare la posizione orizzontale e verticale della macchina. Le informazioni rilevate tramite strumentazione laser sono state inviate via cavo alla centrale di controllo posta a bordo pozzo di spinta direttamente ad un computer che permette via software di controllare la navigazione dell'unità di perforazione. Alla centrale di controllo sempre via cavo sono stati inviati costantemente tutti i segnali provenienti dalle strumentazioni sulle apparecchiature all'interno della unità di perforazione e non quali, circuiti dell'acqua, stazioni intermedie, ecc. Onde evitare di causare danni all'apparecchio, esso è stato predisposto solo dopo l'avvenuto montaggio del carrello di spinta e dei suoi accessori. Il laser e la sua piastra di fissaggio sono stati montati direttamente sulla soletta in calcestruzzo.
Il laser è stato messo in posizione verticale con l'ausilio di madreviti filettate (poste sotto la piastra) e il tutto fissato con dadi di bloccaggio. Il laser è stato montato come unità a sé stante, senza essere a contatto con altre apparecchiature o elementi circostanti che potessero comprometterne la precisione.
Durante tutto il percorso sotterraneo l'unità di perforazione è stata continuamente monitorata con rilievi costanti, a seguito dei quali piccole inevitabili correzioni di direzione, in genere di pochi decimi di grado, erano impartite alla testa della macchina dalla centrale di comando posta a lato del pozzo di spinta. Questo sistema ha permesso di raggiungere un elevatissimo grado di precisione finale difficilmente riscontrabile con tecniche tradizionali, infatti si sono avuti scartamenti dell'ordine del millimetro in orizzontale e di 2-3 centimetri sulla verticale. Altri controlli di verifica erano eseguiti una o due volte al giorno dal topografo della Freytag per controllare che le strumentazioni della macchina fossero ben ca-

▼ Interno del microtunneller AVN 2000 D

librate.
Con la rotaia di spinta possono essere spinti tubi fino a 4 metri di lunghezza. La testa di spinta trasferisce la forza di spinta dai martinetti al tubo e quindi alla macchina. La piastra reggispinta trasferisce la pressione di spinta, derivante dai martinetti, sulla parete del pozzo. I martinetti costituiscono l´unità di spinta del carrello e sono inseriti tra la testa e la piastra reggispinta. La testa viene spinta in avanti dal movimento dei martinetti. Quando la colonna di anelli ha completato l'attraversamento, è andata a cozzare contro il palancolato del pozzo di arrivo preventivamente predisposto. A questo punto è stata fatta un´iniezione di rinforzo sulla palancola nel punto di perforazione e si è ricavato il foro sulla palancola, è stato saldato l´anello del giunto di perforazione e infine è stata avvitata la gomma della guarnizione con un morsetto. A questo punto si è continuato a spingere fino a che l'unità di perforazione non è penetrata completamente all'interno del pozzo di arrivo. A questo punto si assorbe l´acqua e la sospensione di bentonite dal pozzo di arrivo, si fa scorrere la macchina e la si recupera. Quando la fila di tubi ha raggiunto la posizione desiderata all'interno del pozzo, si svita la guarnizione di destinazione e la si recupera. Durante l'intero arco di durata del lavoro non si sono manifestate infiltrazioni di acqua all'interno del microtunnel.

▲ Fiume Adige. Postazione di arrivo: uscita della fresa

▲ Fiume Adige. Postazione di arrivo: uscita e recupero della fresa

Prefabbricazione dei tronchi di condotta

La prefabbricazione dei tronchi di condotta da varare all'interno del microtunnel è stata realizzata mediante le seguenti fasi di lavoro:

- *Sfilamento dei tubi DN 1200 sp. 25,9 mm. dalla catasta di stoccaggio all'area di montaggio.*

Le tubazioni sono state prelevate, portate all'interno dell'area di montaggio e messe in posizione, pronte per essere saldate, impiegando un Trattore posatubi (Side-boom) tipo Fiat FP 60.

- *Saldatura delle tubazioni (DN 1200 sp. 25,9 mm).*

In relazione alla lunghezza (ca. 15 m) ed al peso (ca. 13 t) dei singoli tubi, ed allo scopo di agevolare la movimentazione dei tronchi di condotta saldata durante le operazioni di varo all'interno del microtunnel, si è optato per la prefabbricazione di n. 6 tronchi di condotta, di lunghezza di circa m 100 cadauno, all'Adige, e di 7 tronchi, di lunghezza variabile tra 98 e 148 m, al Po.
Il controllo del 100% delle saldature è stato eseguito con apposita apparecchiatura a Raggi X ed una verifica con metodo ultrasonografico.
Ciascun tronco di condotta è stato sottoposto a precollaudo idraulico ad alta pressione con acqua e pressurizzazione fino a 112,5 bar (1,5 volte la pressione di esercizio).
La registrazione della pressione e della temperatura è stata effettuata tramite manotermografo.
Il rivestimento dei giunti di saldatura è stato fatto mediante applicazione a caldo di un manicotto termorestringente dopo preriscaldamento della superficie da rivestire alle temperature di 100°C mediante induzione.
Il generatore utilizzato per il riscaldamento fornisce corrente a media frequenza alla pinza, la quale crea un campo magnetico che preriscalda la tubazione in modo veloce e soprattutto omogeneo.
Si è proceduto all'applicazione a caldo di manicotto termorestringente, costituito da polietilene estruso ad alta densità, con spessore minimo di 3 mm; il controllo dell'integrità di tale rivestimento è stato effettuato tramite uno strumento denominato «Holiday Detector».
Si è applicata sulla circonferenza della tubazione una «molla» (sensore a spirale) che aderiva al rivestimento in ogni suo punto, si è collegata la molla allo strumento per mezzo di apposito attacco e si è fatta avanzare lentamente in senso parallelo alla condotta. Quando la molla intercettava un punto in cui il rivestimento era danneggiato, lo strumento emetteva un suono molto acuto segnalando la «falla». La riparazione del rivestimento veniva poi eseguita a caldo, mediante messa in opera di mastice in poliolefine e pezza in polietilene.

Formazione di collari distanziatori

Sui tronchi di condotta sono stati applicati, ad interasse di 5 m, dei collari distanziatori a base di malta poliuretanica. Questi collari sono di sezione trapezoidale, con larghezza, nel punto di appoggio, di mm 180, altezza mm 70 e

▼ Formazione dei collari con resina Marin Block

larghezza nel punto massimo di mm 300. Sono stati realizzati tutt'intorno al tubo sia per mantenere una continuità strutturale del collare stesso sia per mantenerne l'efficacia nel caso che il tubo, durante l'avanzamento all'interno del tunnel, fosse ruotato.
Il rivestimento in polielitene della condotta nel tratto interessato del collare distanziatore è stato irruvidito mediante spazzolatura meccanica e perfettamente pulito. Al fine di poter applicare i collari distanziatori, sono state approntate casseforme metalliche dotate di guarnizioni a tenuta e provviste di un'apertura sulla sommità.
Per ottimizzare i tempi di produzione si sono costruite n. 6 casseforme, consentendo di eseguire 15-18 collari distanziatori al giorno ed evitando il continuo disarmo e montaggio della cassaforma stessa.
Il prodotto utilizzato per la realizzazione dei distanziatori (Marin Block HD) viene fornito dalla Casa produttrice in versione predosata e separata in due componenti che, dopo una opportuna miscelazione, sono versati nella cassaforma fino al riempimento della stessa e, per ogni collare, sono stati utilizzati circa 65 l di composto. Dopo ca. 10 minuti la malta raggiungeva un grado di indurimento sufficiente e si procedeva al disarmo della cassaforma.

▲Collari in resina Marin Block

▼Prove di tenuta e di resistenza sui collari distanziatori. Si nota lo scorrimento a fine corsa dei martinetti

Varo: fasi di preparazione

Pista di varo Adige

Una volta ultimata la prefabbricazione dei tronchi di condotta, si è proceduto alla formazione della pista di varo.
E' stato eseguito un rilevato in ghiaia, in funzione della catenaria di varo prestabilita, che prevedeva un'altezza massima dal piano campagna di 4,20 m, ed una lunghezza dell'imbancamento di 60 m. In coda è stato eseguito uno scivolo, sempre con materiale arido, che da un'altezza di 4,20 m si azzerava a piano campagna su una lunghezza di 36 m. L'imbancamento, di forma trapezoidale, misurava in sommità 6 m ed è stato realizzato con una scarpata a 45°.
Per completare la pista di varo sono stati fatti 20 m di scavo, e dal piano campagna si è raggiunta la profondità di 3,50 m in corrispondenza del pozzo palancolato di ingresso del microtunnel. A causa della scarsa consistenza del terreno, costituito in prevalenza da limi e sabbia con presenza di acqua di falda a quota -0,50 m da piano campagna, lo scavo è stato palancolato su entrambi i lati, per una lunghezza di 15 m, e ciò allo scopo di contenere al massimo la sezione di scavo per consentire ai mezzi, utilizzati durante le operazioni di varo della condotta, di avvicinarsi il più possibile al ciglio scavo.
Per la formazione della pista di varo sono stati messi in opera ca. 3500 m^3 di ghiaia.

Pista di varo Po

E' stato eseguito uno sbancamento, in funzione della catenaria di varo prestabilita, che prevedeva una profondità massima dal piano campagna di -4,00 m e per una lunghezza di 60 m in corrispondenza del pozzo palancolato di ingresso del microtunnel. Lo sbancamento, di forma trapezoidale, è stato realizzato con una scarpata a 45°.
A causa della scarsa consistenza del terreno, costituito in prevalenza da limi e sabbia con presenza di acqua di falda a quota -2,50 m da piano campagna, la pista è stata realizzata su tondonata con tronchi di 30 cm di diametro.

▼Fiume Adige. Terrapieno per varo della condotta

▼Fiume Po. Preparazione della pista di varo con sbancamento

Posizionamento argano

Contemporaneamente alla pista di varo, si è posizionato l'argano a tamburo per il traino. L'argano è arrivato direttamente dalla Germania ed è stato usato sia all'Adige che al Po. All'Adige è stato realizzato un basamento in cemento armato, sul quale è stato fissato l'argano e tutti i punti fissi necessari ad eseguire i rinvii. L'argano del Po è stato posizionato all'esterno del palancolato del pozzo di arrivo: tale scelta ha comportato una variante al progetto, che prevedeva il posizionamento all'inter-

no del pozzo. Purtroppo, tale scelta è stata condizionata dal periodo di piena del Po, che ha innalzato la falda di 2 m sopra il livello previsto.

Istituzione del collegamento radiofonico tra il pozzo di partenza e il verricello

È stato installato un impianto di comunicazione via cavo, per assicurare che durante la fase di traino ci fosse un sicuro collegamento radiofonico tra il coordinatore dalla parte del pozzo di partenza e l'operatore dell'argano; ponti radio e telefoni cellulari sarebbero intervenuti in caso di malfunzionamento.

▲ Fiume Po. Argano di tiro

Montaggio della testata di traino DN 1200

La testata di traino è stata saldata alla prima condotta. Tutto il volume del giunto di collegamento è stato completamente saldato in modo da poter sopportare le forze di tiro sorgenti. La perfezione della saldatura di collegamento 48" è stata verificata a mezzo di controlli ultrasonografici e radiografici.

Montaggio del clampa di arresto

Il colletto d'arresto è stato montato all'estremità posteriore del tubo prima di essere messo in posizione di catenaria, in modo tale che, durante il traino del tronco di condotta all'interno del tunnel, l'estremità aperta si trovasse nella posizione di saldatura predeterminata. Il colletto era costituito da due clampe (definiamo anteriore quella collocata in prossimità dell'ingresso del microtunnel): quella anteriore era appoggiata direttamente sul rivestimento, quella posteriore andava direttamente a contatto con il metallo del tubo, da cui era stato preventivamente rimosso circonferenzialmente una porzione di rivestimento pari a 25 cm. Una volta terminata la sua funzione, la clampa è stata rimossa e il tubo nuovamente rivestito in contemporanea al rivestimento della saldatura.

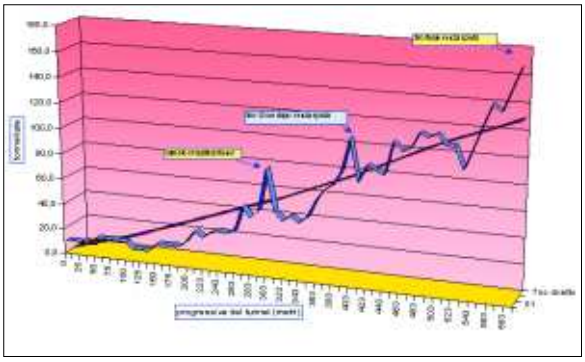
Dispositivo di freno posteriore

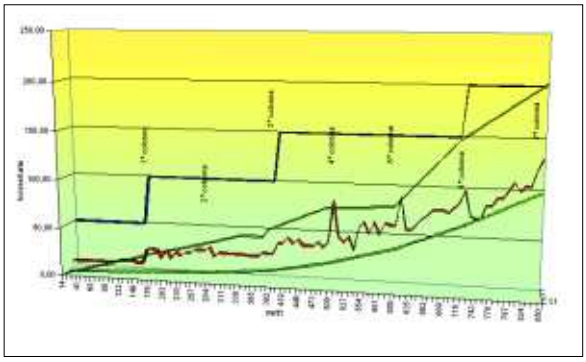
Per via dell'inclinazione del tunnel durante il traino qui descritto, si crea una componente di forza verso il punto più basso del tunnel. Per impedire che la condotta scivolasse in modo indipendente, si è reso necessario porre, alla fine del tronco di condotta, una testata di tenuta collegata tramite una fune ad un verricello montato su un veicolo cingolato di peso idoneo.

Questo dispositivo di freno si è inoltre reso necessario per evitare avanzamenti troppo veloci della colonna, che avrebbero creato problemi di stabilità ai trattori posatubi.

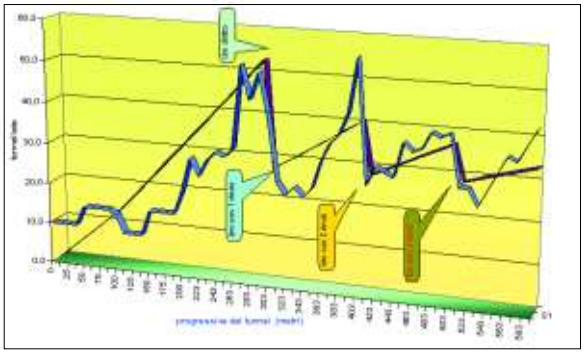
DIAGRAMMI ESEGUITI DURANTE IL VARO DERIVANTI DAL MONITORAGGIO DEL MANOMETRO DELL'ARGANO

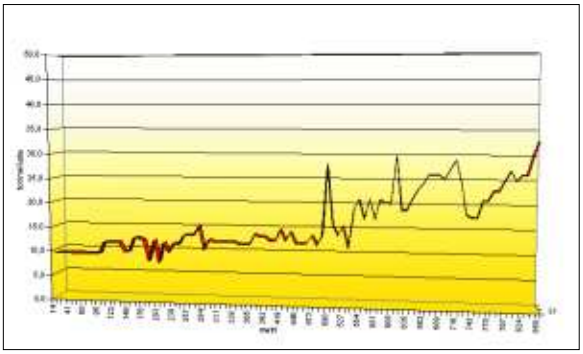
FIUME ADIGE — ***Tiro in testa*** — **FIUME PO**



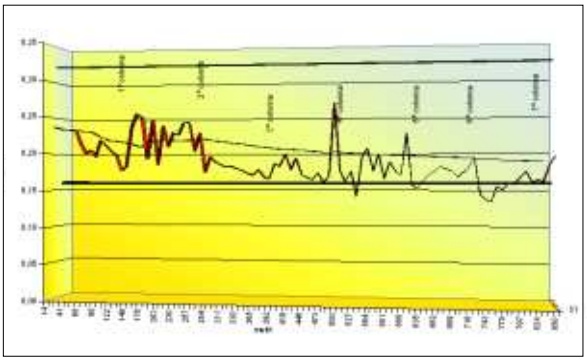


Tiro dell'argano





Andamento attrito



Le ultime misure prima del traino

- Riverificata la perfetta efficienza e disposizione di tutti i mezzi /macchinari /attrezzi.
- Riverificata la perfetta conoscenza delle procedure da parte degli operatori.
- Verificato i segnali e i comandi comuni per tutti i partecipanti.
- Controllato il collegamento radiofonico con l'argano.
- Predisposto il posto di copertura.
- Nominato il coordinatore del varo.
- Verificato che durante la fase di traino della condotta 48"nessuna delle maestranze non autorizzate si trovasse sia nel pozzo di partenza che in quello d'arrivo e all'interno del microtunnel.

Il Direttore Lavori Ing. Stefano Zannier, della Società Enereco, all'interno del tunnel pronto per il varo della condotta.
Si notano i binari di scorrimento sul fondo ed i tubi per l'intasamento in volta

Preparazione microtunnel

Appena completato il microtunnel sono cominciate le operazioni di recupero dei materiali. Con la tecnica di «microtunnelling», tutte le componenti ad alta tecnologia vengono recuperate e possono essere riutilizzate: alla fine, all'interno del microtunnel rimangono solo gli anelli di calcestruzzo. Stazioni di spinta, cavi elettici, cavi del circuito idrico sono stati smontati, portati fuori e puliti con getti d'acqua e aria compressa. All'interno del microtunnel, c'era un continuo ricambio d'aria dovuto all'«effetto camino».

Non appena sono terminate le operazioni di recupero, nuove squadre di operai sono entrate per preparare il microtunnel al varo. Allo scopo di ridurre fino al valore richiesto l'attrito tra la condotta e la soletta del microtunnel durante il traino, la soletta del tunnel è stata munita di quattro bande di scorrimento in PE500 (binari) delle dimensioni di 160x20 mm^2 nell'area dove sarebbero passati i collari di scorrimento. Le bande di scorrimento sono state fissate l'una accanto all'altra nella soletta del tunnel mediante viti. Le teste delle viti sono state sprofondate di ca. 8 mm nelle bande di scorrimento e ben fissate su ogni banda. I bordi dei giunti di collegamento delle bande di scorrimento sono stati smussati per creare un invito al passaggio dei collari.

Una volta completato il posizionamento delle bande in PE si è passati a fissare, tramite collarini, i tubi Ø 100 destinati all'intasamento e al passaggio dei cavi di telecontrollo sul soffitto del microtunnel. I tubi destinati all'intasamento sono stati studiati con l'intento di riempire il microtunnel metà alla volta. Per fare ciò e nel contempo essere certi che nessuna sacca d'aria rimanesse all'interno, i tubi sono stati disposti a canna d'organo. Il tubo più lungo arrivava a metà tunnel e gli altri si interrompevano ogni 50 m, man mano che si procedeva a ritroso.

Sono stati poi montati i dispositivi di centraggio, ovvero quelle strutture destinate a guidare i tubi all'interno del microtunnel senza andare ad interferire con i bordi dell'ingresso del foro. All'Adige tale dispositivo è stato coadiuvato dalla gru, al Po invece, forti dell'esperienza precedente, il dispositivo di centraggio ha subito delle modifiche, trasformandosi in una vera e propria slitta di scorrimento.

Completata anche questa operazione, tutto il microtunnel è stato interamente pulito e si è passati alle ultime operazioni complementari, quali la verifica del tubo portacavo a mezzo di uno

Varo condotta. Accoppiamento e saldatura

Predisposizione per controlli

Fasciatura del giunto di saldatura

scovolino e il trasporto del capocorda dell'argano all'ingresso del tunnel lato pista di varo.

Lubrificazione delle bande di scivolamento nel microtunnel

Si sono segnate all'interno del tunnel le sei/sette (Adige/Po) sezioni che andavano di volta in volta lubrificate. La lubrificazione a tratti ha permesso agli operatori di verificare man mano, per quanto possibile, lo stato dei collari distanziatori; inoltre, in caso di incidente, il coefficiente d'attrito nei tratti non lubrificati sarebbe stato abbastanza alto da frenare l'avanzamento del tubo. Si è proceduto a lubrificare con grasso Biogrease EP 00/000 la superficie di scivolamento nel microtunnel, per una lunghezza iniziale di 300 m; successivamente, sarebbero state lubrificate anche le altre parti di ca. 100 m.

▲ Fiume Adige. Movimentazione colonne di varo

Varo della condotta

La fase più importante e difficoltosa, che ha comportato un notevole impiego di personale e mezzi, è stata quella relativa al varo della condotta all'interno del microtunnel. Di fondamentale aiuto è stata la preventiva pianificazione di tutte le operazioni di varo. Prima dell'inizio di qualsiasi operazione, tutto il personale è stato edotto, in maniera dettagliata, circa lo svolgimento ed i rischi delle varie attività che si sarebbero succedute.

Particolare attenzione è stata dedicata all'informazione degli operatori ai mezzi, informazione avvenuta a mezzo di riunioni tenute sul luogo di lavoro, e che si sono succedute durante tutto il periodo impiegato per le operazioni di varo (7 gg.).

In dettaglio si sono eseguite le seguenti operazioni:

- ***Controllo dell'integrità del rivestimento dei tronchi di condotta.***

In un primo tempo il controllo del rivestimento è stato limitato ai soli punti interessati dalle fasce di sollevamento dei trattori posatubi ed in seguito, dopo che le colonne erano state movimentate arretrandole rispetto alla posizione della pista di varo, si è proceduto ad ultimare il controllo del rivestimento, sempre mediante utilizzo di strumento Holiday-Detector.

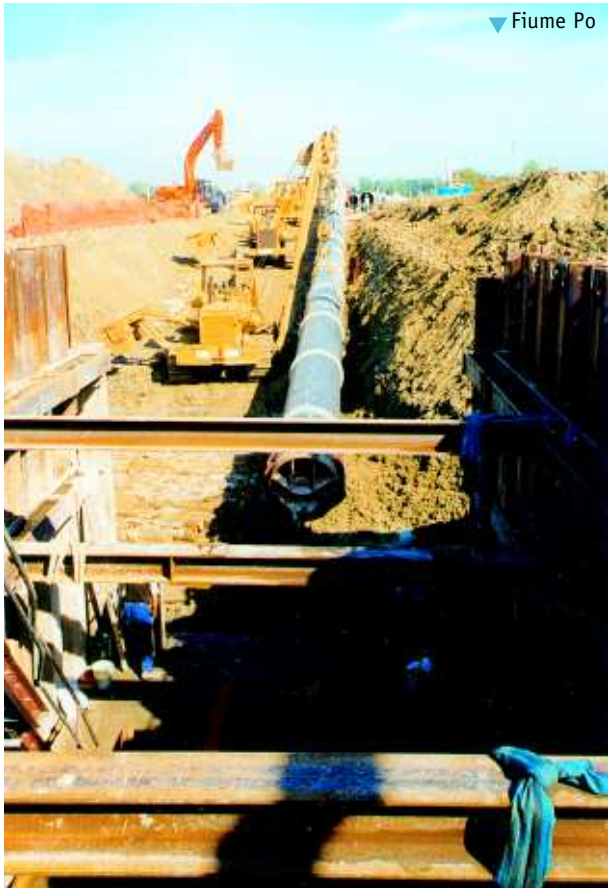
- ***Movimentazione dei tronchi di condotta.***

Per la movimentazione delle colonne sono stati utilizzati n° 5 trattori Posatubi (più uno a disposizione in caso di necessità). L'esatto punto di «imbragatura» di ciascun trattore posatubi era stato precedentemente segnato con vernice spray nelle posizioni stabilite dal progetto.

I tronchi di condotta si presentavano paralleli e affiancati rispetto alla pista di varo. Con la colonna imbragata e sollevata si arretrava sino a raggiungere una distanza, dello scivolo dell'imbancamento, tale da consentire ai trattori posatubi la manovra di avvicinamento alla posizione varo. I mezzi con movimenti molto lenti avanzavano verso la pista di varo, e con piccole correzioni di assetto, si mettevano in posizione fino a riportare l'asse del tronco di condotta in coincidenza con le prosecuzione dell'asse del microtunnel.

Il momento più critico di questa prima fase è avvenuto all'Adige ed è stato quando i mezzi hanno raggiunto e «scollinato» la sommità del rilevato della pista: la lunghezza del tronco di condotta (100 m), associata al numero di mezzi che dovevano eseguire movimenti sincronizzati tra di loro, ha creato qualche problema di coordinamento, dovuto anche al fatto che, essendo i mezzi in movimento ed «a quote diverse»,

▲ Fiume Adige.
▼ Imbocco prima colonna di varo

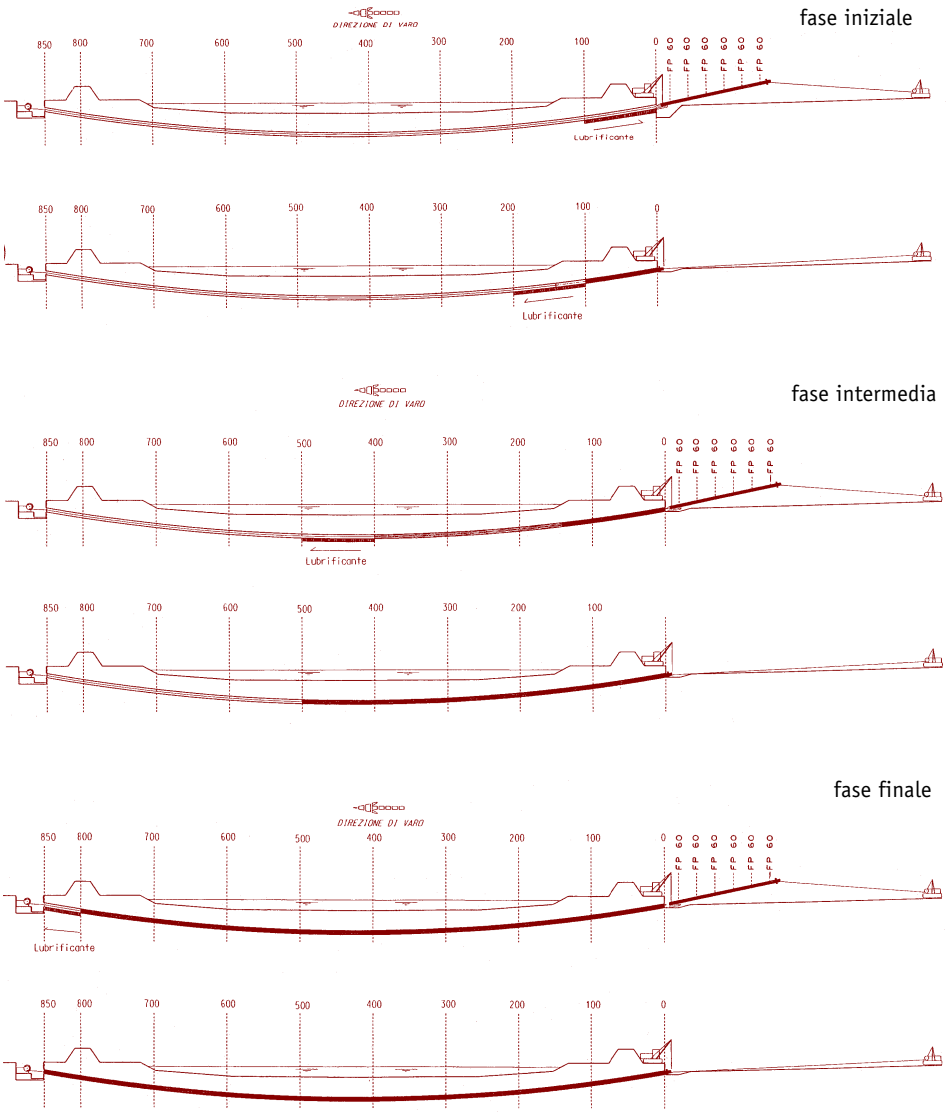


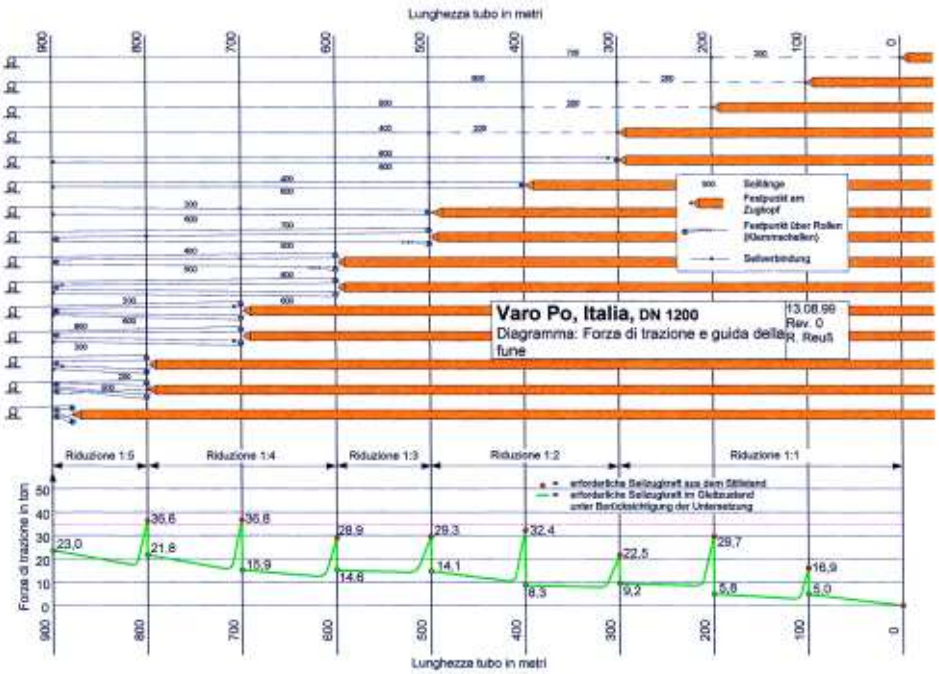
▼ Fiume Po

▲ Fiume Po. Un momento della fase di varo

era problematico per l'operatore vedere il «Capo posa» e seguirne le istruzioni.
Basti pensare che, per percorrere 300 m, ovvero circa la distanza tra il pozzo di ingresso del microtunnel ed il punto di partenza con colonna imbragata, mediamente sono stati impiegati 60 minuti. Durante la discesa della pista di varo, la tubazione veniva tenuta dall'operatore del mezzo ad un'altezza da terra prestabilita, e ciò al fine di imboccare il microtunnel secondo la curva elastica di progetto. Sul rilevato costituente la pista di varo, sono stati posizionati dei pali o stadie ad interasse prestabilito, compreso tra i 17 e i 20 m, riportanti la quota della generatrice superiore della condotta, secondo la curva elastica di imbocco nel microtunnel.
In tal modo, l'operatore di ciascun trattore posatubi, transitando in corrispondenza di ogni palo, doveva semplicemente controllare che la quota riportata sullo stesso coincidesse con la quota di sommità della tubazione trasportata.
Questo sistema si è rivelato particolarmente efficace, garantendo che il carico sostenuto da ciascun Trattore Posatubi fosse effettivamente quello di sua competenza calcolato da progetto, ed evitando il rischio di eventuali sbilanciamenti del carico e quindi situazioni pericolose, stante anche l'altezza da terra dei trattori transitanti sulla pista in rilevato.
In tal modo i tronchi di condotta sono stati portati in posizione, pronti per la fase successiva di tiro all'interno del microtunnel.
Sul 1° tronco era stata precedentemente saldata una «Testa di tiro» atta a ricevere il cavo di traino dell'argano, mentre in coda tutte le colonne erano provviste di un dispositivo di freno, consistente in un tronchetto di tubo DN 1200 saldato e predisposto per permettere l'aggancio di un cavo di adeguato diametro. Cinque colonne inoltre erano state preparate per consentire il montaggio di una «clampa», la cui funzione era quella di fermare l'avanzamento della stringa nella parte finale e bloccarla già in posizione di saldatura prestabilita: la preparazione è consistita

SCHEMA SEMPLIFICATO DELLE FASI DEL VARO FIUME PO





nell'asportazione del rivestimento della tubazione per una larghezza di ca. 25 cm.

• ***Alloggiamento (varo) dei tronchi di condotta all'interno del microtunnel.***

Con questa ultima fase si è proceduto al «Tiro» dei tronchi di condotta, collegati tra loro mediante saldatura, eseguendo in successione le operazioni di seguito descritte. Per la prima operazione di traino la fune è stata fissata direttamente al cappio della testata di tiro, dunque senza usare le pulegge di rinvio che si trovano nella testata (tiro diretto).

Verificato il fissaggio della fune dell'argano alla testata di tiro il capovaro, mediante i segnali convenzionali pre-

Fiume Adige. Fase di varo della condotta

Intasamento: *studio della miscela e fase esecutiva*

I. Contiero (Beton Veneta Srl)

1. Premessa

Al fine di rafforzare le linee di trasporto di gas naturale proveniente dai paesi del Nord Europa, la SNAM ha deciso di realizzare una nuova condotta da 48".

Nel tratto Zimella-Poggiorenatico il problema dell'attraversamento dei fiumi Po, Adige e del Canal Bianco, al fine di ridurre l'impatto ambientale, è stato risolto tramite l'esecuzione di microtunnel al di sotto dell'alveo del fiume del diametro interno di circa 200 cm e quindi l'inserimento della condotta da 48".

L'interspazio che rimaneva tra il tubo in cemento da 200 cm e la condotta da 48" (circa 120 cm) doveva essere intasato tramite un'appropriata miscela cementizia che rispondesse a certe caratteristiche fisico meccaniche al fine di poter applicare alla condotta metallica una protezione catodica contro la corrosione.

Veduta cantiere sul Po - Comune Bondeno

2. Studio della miscela

Le specifiche impartite dalla SNAM S.p.A. a proposito dei materiali da utilizzarsi per il confezionamento della miscela e le caratteristiche fisico-meccaniche della miscela stessa sono state le seguenti:

• inerte di origine calcarea o silicea con granulometria compresa tra 0,5 e 2 mm;

• utilizzo di cemento Portland 32,5 R in quantitativo inferiore ai 100 kg/m^3;

• utilizzo di additivo «aerante-fluidificante» al fine di garantire alla miscela fluida le seguenti caratteristiche:

- contenuto di aria inglobata (in microbolle) in percentuale variabile tra il 15%

stabiliti e verificata ulteriormente la posizione di catenaria del tubo, ha dato il comando per cominciare l'operazione di traino del tronco. Durante tutta la fase di traino due operatori nel pozzo di spinta hanno provveduto ad ingrassare manualmente con Biogrease EP00 / 000 ogni collare distanziatore che scorreva all'interno del microtunnel.

I gli operatori ridotti al minimo all'interno del pozzo e tutti quelli lungo il tronco di condotta hanno assunto una posizione tale da garantire un continuo contatto visivo con il capovaro.

Il tronco di condotta è stato «trainato» all'interno del microtunnel tramite l'argano posizionato nel pozzo di uscita. Contemporaneamente i trattori posatubi tenevano sollevata la colonna accompagnandola nell'avanzamento.

Sulla parte posteriore della colonna era agganciato un cavo Ø 26 mm, comandato da un verricello (portata 20 t), montato su un mezzo Ruspa Fiat AD 20. Al progressivo avanzamento della colonna, l'operatore manovrava il verricello svolgendo il cavo in modo da tenerlo comunque sempre in tiro. Il coordinamento delle operazioni di varo è stato effettuato mantenendo costantemente in contatto via radio tutti gli operatori coinvolti. L'alloggiamento del tronco di condotta all'interno del microtunnel è avvenuto in modo molto lento: mediamente per tale operazione sono state impiegate 2 ore. Dopo ogni avanzamento di 3-4 m il tiro veniva interrotto, in quanto si rendeva necessario riposizionare la colonna: occorreva impedire che i collari distanziatori potessero trovarsi troppo bassi rispetto alla generatrice inferiore del microtunnel, situazione che avrebbe potuto provocare la rottura dei collari stessi.

▲ Fiume Adige. Movimentazione condotta

Il valore della forza di tiro era continuamente monitorato dalla direzione lavori al fine di stimare valori anomali per la forza di tiro, per ogni stringa infilata era stato valutato a priori quale valore si sarebbe dovuto leggere sul manometro dell'argano. Il movimento del tubo durante ogni singolo tiro dell'argano è stato discontinuo, infatti il tubo una volta vinta l'inerzia passava da un attrito statico ad un attrito dinamico molto rapidamente, questo si è tradotto in continui scatti con grosse accelerazioni. Dovuto al fatto che tra attrito statico e attrito dinamico il rapporto è stato di circa 1 a 2, si può immaginare che tutta la forza di tiro dell'argano per vincere l'inerzia si trasformava in energia cinetica improvvisamente, a quel punto la velocità di avvolgimento del cavo era più lenta dell'avanzamento del tubo quindi il

ed il 30% in volume;
- elevata fluidità;
- totale autolivellamento con scarsa essudazione (bleeding);
- assenza di segregazione;

• utilizzo di acqua conforme ai requisiti stabiliti dalle norme UNI 8981/7;
• peso specifico della miscela compreso tra i 14 ed i 18 kN/m³;
• un tempo di miscelazione minimo di almeno 10 minuti;
• resistenza caratteristica a compressione a 28 gg. inferiore ai 0,7 MPa.

Analizzando tali dati e mettendoli in relazione con le difficoltà di posa in opera del conglomerato sono insorte le seguenti problematiche:

• una miscela con solo 100 kg di cemento per m³ d'impasto difficilmente risulta essere pompabile fino a 400 metri di distanza;
• ottenere un peso specifico inferiore ai 18 kN/m³ necessita l'inglobamento di almeno un 20-25% d'aria, parametro che implica la pompabilità della miscela poichè un tale quantitativo d'aria inglobata conferisce alla miscela stessa, durante la fase di pompaggio, un comportamento cosiddetto a «fisarmonica»;
• il diametro massimo dell'inerte prescritto, induce all'utilizzo di una sabbia reperibile in zona caratterizzata dal fatto di essere monogranulare e quindi esaltare il fenomeno della segregabilità.

Disposizione mezzi sul fiume Adige - Comune Terrazzo

Pompa CIFA Invetta 36 con gruppo pompante PA 807 f8

Particolare miscela autolivellante

Verificata la non idoneità della miscela prescritta per effettuare tale intervento, si è intrapresa una campagna sperimentale formulando i seguenti dati di progetto:

• innalzare leggermente il quantitativo di cemento ed utilizzare in aggiunta un materiale avente una finezza dello stesso ordine di grandezza del cemento in modo tale da aumentare l'attitudine della miscela alla pompabilità;
• utilizzare un inerte a basso peso specifico in modo tale da raggiungere la densità richiesta con un minor inglobamento d'aria.

Sulla base di questi dati si è quindi iniziata una sessione di prove, tenutasi presso il laboratorio della Beton Veneta Srl, in cui lo scopo finale era quello di ottenere una miscela avente le seguenti caratteristiche:

• peso specifico di circa 16-17 kN/m³;
• scarso fenomeno di bleeding;
• ottima predisposizione alla pompabilità;
• scarsa resistenza meccanica;
• autolivellante.

manometro dell'argano improvvisamente scivolava sullo zero. Il tubo una volta in movimento era trattenuto solamente dalla fune di sicurezza posteriore che però doveva necessariamente essere lasciata lenta, quindi il tubo avanzando velocemente aveva un freno principale dovuto al valore dell'attrito dinamico e un secondo freno di sicurezza. Il dispositivo di sicurezza posteriore era collegato al verricello tramite una fune che veniva lasciata lenta per evitare maggiori sforzi all'argano, quando il tubo accelerava improvvisamente la fune si tendeva e trasmetteva parte dell'energia cinetica al mezzo a cui era fissato il verricello che appositamente lasciato a cingoli non frenati non di rado avanzava di qualche metro. La certezza di potere controllare il tubo in fase di accelerazione era data inoltre dai mezzi di sollevamento in grado da soli di rallentare e fermare il tubo. Il risultato è stato quindi di un continuo tira e molla tra argano e tubo. L'avanzamento impresso al tubo dallo spunto dell'argano era di circa 1 m nei primi 200 m di introduzione, di 2-3 m nella parte centrale del microtunnel per poi tornare a 1-1,5 m nel tratto finale, in particolare negli ultimi metri di varo si sono visti calare notevolmente gli spunti dell'accelerazione fino ad ottenere un tiro pressoché continuo.

▲ Fiume Po. Fase di varo della condotta

Il monitoraggio dei valori di pressione dell'argano confrontati con la simulazione al computer, oltre a permettere di anticipare al capovaro il comportamento del tubo in fase di accelerazione, ha permesso una costante valutazione degli attriti e quindi una miglio-

Analisi granulometrica delle sabbie

	% passante in peso		
Vaglio UNI (mm)	Sabbia tipo "A"	Sabbia tipo "B"	Miscela
30	100	100	100
25	100	100	100
15	100	100	100
10	100	100	100
7	100	100	100
5	100	87,5	89,4
3	99,1	68,0	72,7
2	97,6	56,2	62,4
1	96,1	36,3	45,3
0,5	86,5	25,4	34,6
0,2	5,4	8,8	8,3
0,0075	0,6	2,8	2,5
Modulo di finezza	1,8	3,6	

3. Prove di laboratorio

La scelta dei materiali da utilizzare si è indirizzata verso quelli già utilizzati nel normale ciclo produttivo:

- *Legante:*

Cemento UNI ENV 197/1 II/A-M 32.5R.

- *Aggiunta:*

Cenere Volante tipo F.

- *Inerti:*

Sabbia di fiume avente diametro massimo 1 mm (Tipo A).

Sabbia di frantoio di origine calcarea diametro massimo 0/5 mm (Tipo B) (cfr. diagrammi granulometrici).

Polistirene espanso con diametro massimo della perla di 5 mm.

- *Addittivi:*

Schiumogeno stabilizzante Lievocem CP 83 S prodotto dalla Levocell Spa.

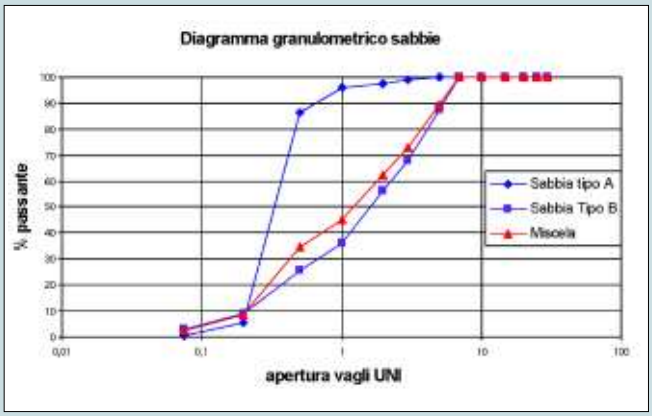
Nella prima sessione di prove utilizzando i componenti sopraelencati la miscela ha evidenziato le seguenti caratteristiche:

- Peso specifico 17,0 kN/m^3
- Consistenza (UNI 8520 metodo A): >FA5
- Scarso essudazione (bleeding)
- Parziale galleggiamento del polistirene espanso sulla malta cementizia.

Per ovviare a quest'ultimo indesiderato fenomeno, nella seconda sessione di prove si è pensato di utilizzare un polistirene con diametro massimo della perla di 2±0,5 mm avente densità di 20 Kg/m^3 in modo da diminuire la spinta idrostatica sviluppata dalla malta sul singolo granulo di polistirene. Tale scelta inoltre ha comportato una miglior distribuzione ed una maggior stabilità dell'inerte leggero all'interno della miscela durante la fase di pompaggio.

I risultati di questa seconda prova possono così essere riassunti: la miscela avente un peso specifico di 16,8 kN/m^3 presentava assoluta assenza di bleeding, il polistirene espanso rimaneva uniformemente disperso all'interno della pasta cementizia ed il contenuto d'aria inglobata è risultato essere del 10% circa. La consistenza della miscela rilevata tramite la misura dello spandimento (UNI 8020-Metodo A) è risultata essere superiore alla classe FA5.

Per quanto concerne la resistenza meccaniche a compressione semplice si sono ottenuti valori medi a 28 giorni di 3,5 MPa.



4. Prove sul campo

Alla luce di quanto ottenuto in laboratorio si è pensato di testare la pompabilità della miscela facendo delle prove di simulazione utilizzando come centrale di produzione d'appoggio quella di Legnago (VR) dato che sarebbe stata, in caso di esito positivo, quella più vicina ai cantieri da rifornire.

E' stata studiata e provata anche la fase di carico dei componenti in modo da ottimizzare la miscelazione e quindi l'uniformità della miscela.

La procedura ci carico che si è riscontrato essere più idonea può essere cosi schematizzata: 1) immissione del 70% dell'acqua d'impasto contemporaneamente all'additivo schiumogeno; 2) introduzione del polistirene espanso; 3) caricamento delle sabbie e dei leganti in modo proporzionale; 4) introduzione del rimanente 30% dell'acqua necessaria.

Per la prima prova si è utilizzata un'autobetonpompa Cifa Magnum 24/28 avente un gruppo pompante modello PB 606 L con le seguenti caratteristiche:

- Portata teorica: 65 m^3/h

re programmazione dei rinvii da effettuare per aumentare la potenza dell'argano.
L'andamento degli attriti tra collari e superfici di scorrimento è stato diverso tra l'Adige e il Po, all'Adige un difetto nel montaggio delle strisce in PE500 ha portato ad un attrito variabile tra 0,15 e 0,32 con una punta di 0,4 e una media di 0,28. Al Po risolto i problemi di montaggio, gli attriti rilevati sono rimasti in un range di 0,14 e 0,25 con una media di 0,19.
In appoggio ai mezzi posatubi, all'Adige, è stata utilizzata anche una gru a traliccio cingolata, il cui compito era quello di aiutare il sollevamento dei primi 4-5 m di colonna in ingresso del microtunnel.
Come precedentemente accennato, 5 tronchi di condotta erano stati predisposti per il montaggio di una clampa di arresto: tale clampa, formata da un collare in carpenteria metallica, veniva

▲ Fiume Adige. Fase di varo della condotta

montata a circa 3 m dalla coda della colonna all'Adige e a circa 6 m al Po e la sua funzione era quella di arrestare l'avanzamento del tronco di condotta nel punto prestabilito per consentire le successive operazioni di saldatura.
Il giorno seguente, contemporaneamente allo svolgimento delle operazioni preliminari relative al varo della 2° colonna, si è proceduto al taglio del dispositivo di freno sulla 1° colonna, ed alla preparazione delle testate per il lavoro di saldatura.
Al fine di ridurre il più possibile i tempi complessivi relativi alle operazioni di varo, la saldatura di collegamento delle colonne è stata eseguita impiegando n° 4 saldatori anziché 2.
Il controllo radiografico della saldatura di collegamento all'Adige è stato effettuato utilizzando un apparecchiatura con esposizione dall'esterno: ciò

- Alesaggio cane calcestruzzo: 176 mm
- Corsa canne calcestruzzo: 1000 mm
- Pressione massima d'esercizio sul calcestruzzo: 57 bar
- Frequenza di scambio delle canne pompanti: 44 cicli/min.
- Rapporto idraulico: 6,1

E' stata predisposta una linea di 70 m di tubazione in acciaio (diametro interno 100 mm) comprensiva di quella ancorata al braccio semovente dell'autobetonpompa in modo che tutte le perdite di carico dovute alle varie curve di raccordo simulassero una maggior lunghezza della tubazione stessa.
La prova svoltasi alla presenza dei tecnici della ditta appaltante e della Snamprogetti ha avuto esiti più che soddisfacenti: infatti pur facendo lavorare l'autobentompompa Cifa Magnum 24/28 al massimo delle prestazioni consentite per il particolare lavoro e quindi con pressioni sulla miscela dell'ordine dei 20 bar, sia l'aria inglobata che il polistirene espanso rimanevano stabili all'interno della miscela.
Rassicurati dai risultati ottenuti, in accordo con la ditta appaltante e la direzione lavori, si è organizzata una seconda prova che simulasse al meglio la situazione reale.
Sì è predisposta una linea di tubazioni in acciaio del diametro interno di 100 mm e lunga circa 360 metri sulla banchina del fiume Adige in modo tale da sfruttare il dislivello di quest'ultima per simulare in un certo modo l'andamento del microtunnel. In questo caso si è utilizzata la pompa per calcestruzzo di serie modello Cifa Invetta 36 dotata del gruppo pompante PA 807 F8 avente le seguenti caratteristiche:
- Portata teorica: 78 m^3/h
- Alesaggio canne calcestruzzo: 230 mm
- Corsa canne calcestruzzo: 1500 mm
- Pressione massima d'esercizio sul calcestruzzo: 66 bar
- Frequenza di scambio delle canne pompanti: 21 cicli/min.
- Rapporto idraulico: 5,29.

La tubazione metallica in questo caso è stata collegata direttamente alla mandata in uscita della pompa tramite una tubazione in gomma flessibile spiralata avente una resistenza d'esercizio di 60 bar. Un secondo tratto di tubazione flessibile è stato collegato nella zona terminale della tubazione metallica in modo che la miscela fosse pompata all'interno di un'autobetoniera senza provocare nessun spargimento indesiderato di materiale.
Si è pensato di far precedere il pompaggio della miscela vera e propria da un sistema di acqua e boiacca cementizia che avesse la funzione di lubrificare la condotta: tale sistema pensato in accordo con i tecnici della era così strutturato:
- una palla di spugna (usualmente utilizzate per la pulizia della linea) avente la funzione di «tappo»;
- 50 litri d'acqua circa;
- una seconda spugna;
- 1 m^3 circa di boiacca cementizia.

La funzione della palle di spugna era quello di creare un certo ostacolo alla miscela stessa, in modo tale da generare una controspinta e far sì che la tubazione fosse lubrificata lungo tutta la generatrice.
La fase di pompaggio della miscela è iniziata e proseguita senza alcun intoppo, arrivando a registrate pressioni di 60-70 bar sul circuito idraulico della pompa che equivalgono ad una pressione sulla miscela di circa 10-15 bar.
Bisogna comunque precisare che parallelamente a tali prove di conformità, su richiesta della ditta appaltante e della direzione lavori è stata verificata la non idoneità della miscela inizialmente prescritta.

Postazione di spinta: predisposizione per l'intasamento

5. Fase esecutiva
Per quanto concerne la metodologia dell'intasamento si è concordato con la comittenza la

ha comportato tempi di esecuzione di gran lunga maggiori rispetto alla soluzione con apparecchiatura dall'interno usata al Po (3 h. contro 40-45 minuti, compresa preparazione). Tale scelta all'Adige è stata dettata dalla necessità di garantire le migliori condizioni di sicurezza, dovendo operare con la condotta posizionata sul rilevato a 9 m dal suolo.
Una volta terminato il controllo della saldatura, eseguite le analisi ultrasonografiche, ed in attesa degli esiti radiografici, si è proceduto alla rimozione della clampa di freno ed ai lavori preparativi per il rivestimento della saldatura. Non appena ricevuto l'esito positivo del controllo radiografico, sono iniziate le operazioni di rivestimento giunti (sabbiatura ed applicazione di manicotto termorestringente), che si sono dovute estendere anche alla superficie non rivestita occupata dalla clampa di arresto.
Immediatamente dopo l'ultimazione dei lavori di rivestimento si è iniziata l'operazione di tiro della 2° colonna.
La sequenza delle operazioni che si sono succedute, protraendosi per 7 giorni, per il varo completo delle n° 6 colonne dell'Adige e sostanzialmente identico per le n° 7 del Po, è stata la seguente:

1° giorno
varo della 1° colonna
2° giorno
saldatura 1° - 2° colonna, varo 2° colonna
3° giorno
saldatura 2° - 3° colonna, varo 3° colonna
4° giorno
operazioni di varo sospese per riposo
5° giorno
saldatura 3° - 4° colonna, varo 4° colonna
6° giorno
saldatura 4° - 5° colonna, varo 5° colonna
7° giorno
saldatura 5° - 6° colonna, varo 6°. colonna.

Per una lunghezza complessiva di tubazione varata pari a 595 m all'Adige e

▲ Fiume Po. Fase di varo della condotta

metodologia di seguito descritta.
Si sono posizionate sulla parte sommitale del tubo in cemento del diametro di 200 cm, delle tubazioni in pvc del diametro interno di 100 mm. Tali tubazioni sono state poste in opera con uno schema che può essere paragonato a quello delle canne di un organo: è stata posizionata una prima tubazione di lunghezza pari alla metà dello sviluppo del microtunnel (300 m circa per l'Adige e 400 m circa per il Po) e le successive in modo tale che la lunghezza fosse di circa 50 metri inferiore a quella precedente.
Si sono raccordate le tubazioni predisposte nel microtunnel con la mandata in uscita della pompa tramite tubi in gomma spiralati che venivano mantenuti stabili tramite un sistema di tiranti e degli appositi giunti in pvc opportunamente studiati dalla ditta appaltante.
In fase esecutiva, poiché i tubi posti in opera avevano una resistenza nominale d'esercizio di 6 bar e di 20 bar a rottura, si è aumentata la fluidità della miscela in modo tale da ridurre la pressione di pompaggio sulla miscela e di portarla a circa 6-7 bar. Pur aumentando il quantitativo d'acqua la miscela ha mantenuto le sue caratteristiche di non segregabilità e di scarsa essudazione (bleeding).
La fase dell'intasamento vero e proprio può essere suddivisa in due fasi.
In un primo momento veniva iniettata la miscela sul tubo che sfociava in corrispondenza del punto mediano del tunnel in modo da formarsi un tappo. Successivamente si continuava a iniettare il materiale tenendo conto dei quantitativi, delle pressioni di pompaggio che si registravano sul manometro della pompa e, controllando che i tubi più corti fossero ancora liberi o meno con l'utilizzo dell'aria compressa.
Quando la pressione del circuito idraulico della pompa superava il valore di 60-70 bar veniva cambiato il tubo d'iniezione e si cominciava quindi ad iniettare su quest'ultimo.
Un particolare tecnico di fondamentale importanza per il tipo d'intervento effettuato è stato quello di mantenere valori di pressioni di pompaggio e idrauliche contenute e costanti, senza picchi di pressioni anche nelle fasi di scambio delle canne pompanti e ciò è stato possibile grazie all'ottimo funzionamento del circuito idraulico logico del gruppo pompante pompante Cifa PA 807 F8.

Imbocco microtunnel ad intasamento completato

Bisogna aggiungere inoltre che pur avendo basse pressioni di pompaggio si è riusciti a mantenere portate di circa 50-60 m^3/h, come richiesto dalle tempistiche di cantiere e riuscendo a completare ogni singolo cantiere nei tre giorni previsti dalla ditta appaltante, dato che erano stati preventivati e quindi forniti circa 1100 m^3 per il cantiere sull'Adige e circa 1750 m^3 per quello sul Po.
Per quanto concerne l'aspetto organizzativo dell'intervento, appurato già nella fase sperimentale che la centrale di carico utilizzata sarebbe stata quella di Legnago, si è pensato di utilizzare tutti autocarri con quattro assi ed autobetoniere Cifa modello RY 1300 D12 aventi un tamburo della capacità volumetrica di 18,6 m^3 ed effettiva 12 m^3, in modo tale che caricando 10 m^3 di miscela per volta la miscelazione sarebbe avvenuta in maniera ottimale. Il numero dei mezzi impiegati è stato valutato in funzione della portata della pompa e della distanza dei cantieri di scarico: per quanto riguarda quelli sul fiume Adige, distanti in media 18 km sono state utilizzate in media 8 autobetoniere, mentre per quelli sul fiume Po, distanti in media 45 km, se ne sono utilizzate 15.
Bisogna quindi ammettere che l'intero organico dell'azienda è stato messo a dura prova, riuscendo comunque a rispettare l'usuale piano delle consegne.

Particolare ringraziamento alle ditte:
C.I.F.A. Spa - Novate Milanese (MI)
Levocell Spa - Milano

▲ Impianto Well Point durante l'esecuzione dello scavo in linea

860 m al Po.
Per quanto concerne i tempi di esecuzione di tutte le operazioni (Controllo del rivestimento, movimentazione, accoppiamento e saldatura, controllo radiografico, rivestimento giunti e tiro della colonna), mediamente sono state impiegate 16 h all'Adige e 13 h al Po.
Determinate fasi sono state realizzate con l'ausilio di illuminazione notturna (Rivestimento giunti e tiro della condotta all'Adige), ottenuta per mezzo di Torre Fari che hanno consentito una illuminazione «a giorno» dell'intera area di lavoro. La scelta di proseguire le attività, senza alcuna sosta nell'arco della giornata, è stata dettata da motivi di sicurezza, onde evitare il rischio di eventuali cedimenti della pista e dei trattori posatubi con il tronco di condotta sollevato.

Riassumendo le fasi successive del tiro sono:

- battuta della clampa/colletto di fermo, allentamento graduale del cavo di sicurezza, lubrificazione;
- taglio e spostamento della testata di coda, cianfrinatura, trasporto della nuova stringa in catenaria;
- avvicinamento tubo mediante l'ausilio della gru, accoppiamento, saldatura, radiografia, rivestimento, controlli, smontaggio della clampa di fermo, verifica e ripristino del rivestimento, tiro dei tronchi, sgancio delle fasce dei side-boom, verifica del tiro dell'argano/regolazione della velocità.

Iniezioni di consolidamento dell'argine al Po

In accordo alle indicazioni della committente, si sono realizzate, solo sugli argini del Po, una serie di iniezioni di consolidamento per annullare la remota ipotesi della creazione di un sifonamento lungo l'esterno del microtunnel. La tecnica prevedeva di realizzare una struttura sotterranea mediante la formazione di una fitta maglia di «micropali» realizzati con getti di cemento ad alta pressione e anima portante in PEAD del diametro nominale di 10 cm.
I micropali realizzati sui due argini costituiscono una geometria a pettine incrociato tutt'intorno al microtunnel che è stato intercettato a circa 25 m di profondità rispetto all'unghia del corpo arginale.

Montaggio dei tratti di condotta all'esterno del microtunnel

Con questa fase si è proceduto all'ultimazione dei lavori relativi alla costruzione della linea. Sono state preparate n. 2 curve di ripresa (curve verticali basse), di cui n. 1 con $\alpha = 11°$ utilizzata lato Loc. Terrazzo, e n. 1 con $\alpha = 9°30'$ utilizzata lato Loc. Spinimbecco per l'Adige e n. 1 con $\alpha = 5°00'$ utilizzata lato Loc. Ficarolo, e n. 1 con $\alpha = 11°50'$ utilizzata lato Loc. Salvatonica per il Po.
Si è poi proseguito con il montaggio della condotta fino al limite di batteria contrattuale dell'attraversamento, eseguendo le ultime saldature.
La tubazione è stata inoltre predisposta, mediante saldatura dei piatti di prova, per l'esecuzione della fase successiva di «Collaudo Idraulico».

▲ Saldatura in manuale di un giunto

Collaudo idraulico

Questa ultima fase relativa ai lavori di montaggio meccanico prevede n. 4 distinte operazioni descritte per il fiume Adige e sostanzialmente identiche per il fiume Po:

- Riempimento
- Pressurizzazione
- Svuotamento
- Asportazione dell'acqua residua.

Riempimento

Il riempimento con acqua della condotta viene eseguito per mezzo di una «Pompa di Riempimento» alimentata da un vascone con battente di almeno 2 m.
In questa fase l'acqua fa avanzare un Pig, fornito di guarnizioni bidirezionali, il cui scopo è quello di spiazzare l'aria presente all'interno della tubazione: l'operazione viene ripetuta anche con l'ausilio di un secondo Pig.
La Stazione di Prova è stata allestita lato monte senso gas (Località Terrazzo) ed è stata utilizzata l'acqua del Fiume Adige prelevata da un canale di irrigazione ubicato nelle vicinanze della Stazione stessa (ca. 300 m).
Per completare l'intera operazione di

BETON VENETA Srl

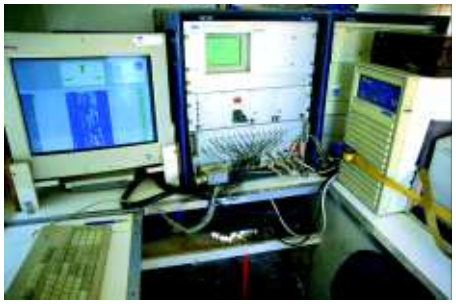
Costituita nel 1980 con sede legale a Sant'Elena (PD), la Beton Veneta Srl., operante nel settore dell'edilizia, inizia la produzione effettiva del calcestruzzo nel 1981 ottenendo risultati sempre migliori. I cinque soci fondatori, ancora attivi in azienda, sono riusciti infatti a consolidare la credibilità e l'immagine della società verso i fornitori, la clientela e il sistema bancario. A riprova di ciò il fatturato mostra un notevole incremento soprattutto negli ultimi anni, passando dai 19,590 miliardi del 1995 ai 34 miliardi previsti per il 1999.
Sebbene la produzione di calcestruzzi normali rappresenti la principale attività, la Beton Veneta Srl ha investito notevoli risorse nello sviluppo e promozione di calcestruzzi alleggeriti con polistirolo (POLICAL) e sughero.
Il prossimo obiettivo della società sarà quello della certificazione della qualità dei prodotti in base alle normative UNI-ISO 9000.

Numero Impianti: Nove
4 (provincia di Padova)
5 (provincia di Verona)
Produzione 1999: 350.000 m³ circa
Dipendenti: 60
Autobetoniere: 27
Autobetonpompe: 14
Autoarticolati: 4
Pale gommate: 9

riempimento sono stati utilizzati ca. 1000 m³ di acqua e sono state impiegate 6 ore.

Pressurizzazione
L'acqua nella condotta è stata portata ad una pressione di 40 bar per 96 ore onde consentire la regimazione termica e si è quindi passati alla pressurizzazione della condotta.
Sono state eseguite n. 2 prove di pressurizzazione: prova di resistenza (durata 1 ora) e prova di collaudo idraulico (durata 48 ore). La pressione di resistenza nel punto più basso è stata di 114,62 bar, ma trascorsa un'ora, la pressione è stata poi diminuita a 106 bar e mantenuta per 48 ore.

Svuotamento
Una volta ultimato il collaudo idraulico si è proceduto allo svuotamento della tubazione dall'acqua, eseguito in senso contrario al riempimento. Per mezzo di un compressore collegato al piatto di prova di arrivo, è stata immessa aria per fare avanzare il Pig bidirezionale. L'avanzamento dello stesso ha come effetto la fuoriuscita dell'acqua dalla condotta. L'operazione viene ripetuta anche con il secondo Pig.



Asportazione dell'acqua residua
Per asportare l'acqua residua si fa passare all'interno della tubazione, per un certo numero di volte, un Pig unidirezionale in senso contrario al riempimento, finchè dalla tubazione non fuoriesca più acqua residua.
Le caratteristiche di quest'ultimo Pig sono diverse da quello utilizzato per il riempimento: presenta n. 4 guarnizioni «a tazza» che consentono di raccogliere e portare avanti una maggiore quantità di acqua; il senso di avanzamento è però unidirezionale.
L'aria ad alta pressione immessa nella tubazione da un compressore fa avanzare il Pig che raccoglie e fa fuoriuscire l'acqua residua rimasta nella condotta; questa operazione è stata eseguita due volte.

Intasamento

Al termine delle operazioni di collaudo si è proceduto all'intasamento dell'intercapedine d'aria tra il tubo e l'interno del microtunnel. La miscela per l'intasamento necessaria a proteggere catodicamente il tubo è stata progettata dalla Beton Veneta dopo una serie di prove sperimentali. Si veda la scheda tecnica annessa per la fase esecutiva e per la tipologia della miscela.

▲ Attrezzature e cabina di collaudo.
◀ Il responsabile della supervisione Lavori verifica i dati di collaudo

Ripristino dell'area

Per il ripristino dei terreni i circa 3500 m³ di ghiaia messi in opera per la formazione della rampa di varo dell'Adige, sono stati rimossi, caricati e trasportati a deposito.
Le aree interessate dai lavori sono state accuratamente pulite, i corpi estranei sono stati rimossi e si è ripristinato la morfologia iniziale.
Il terreno vegetale che durante la fase di preparazione dell'area di montaggio era stato accantonato a lato, è stato rimesso in sito mediante stesura uniforme.

Considerazioni generali

Il montaggio meccanico con la metodologia di varo seguita non ha creato particolari problemi se non un eccessivo dispendio di energie nel lavoro dovuto ai rinvii all'interno del microtunnel. Grazie ai particolari accorgimenti adottati, gli attriti ottenuti sono stati molto soddisfacenti consentendo di utilizzare un piccolo argano e pochi rinvii per le intere operazioni. Con questa tecnica tutti i materiali per realizzare il microtunnel sono stati recuperati e a fine lavoro sono rimasti in opera solamente gli anelli in calcestruzzo armato.
I collari distanziatori dopo un percorso di 860 m non hanno dimostrato segni di usura e hanno svolto efficacemente il loro compito dimostrando di aderire perfettamente al rivestimento del tubo. Il microtunnelling si è dimostrata una tecnica consolidata, molto precisa ed altamente affidabile, a basso impatto ambientale, a costi economici contenuti e con tempi più rapidi rispetto alle tecniche convenzionali, in grado di garantire un elevato grado di sicurezza sul lavoro. ■

Le imprese

TRE COLLI S.p.A.
Sede legale e uff. amministrativi:
via Cornini Malpeli, 2 - Fidenza (PR)
Sede operativa: via Jutificio, 1 Carrosio (AL).
Società fondata nel 1971, opera principalmente nelle seguenti attività di costruzione:
- Condotte e impianti per oleodotti e gasdotti.
- Lavori civili e meccanici di manutenzione e servizi di pronto intervento su reti di oleodotti e gasdotti.
- Costruzione e montaggio strutture prefabbricate in cemento armato per edifici industriali, commerciali, sportivi e viabilità.
- Opere civili e di urbanizzazione.

ENERECO S.C.a.r.l.
Sede: via Divisione Carpazi, 14 - Fano (PS).
Enereco è stata fondata nel 1988 da un gruppo di progettisti esperti, che hanno consolidato le loro conoscenze professionali attraverso attività pluriennali con le maggiori compagnie di ingegneria, fornendo attività di supervisione e consulenza, ingegneria per impianti petrolchimici, condotte, sistemi onshore e offshore, impianti di trattamento, infrastrutture civili ed industriali. Organizzata in settori disciplinari, Enereco può garantire più di 100000 ore/uomo per anno.

LUDWIG FREYTAG GmbH & Co
Sede: Ammerlander Heerstrasse 368
D-26129 Oldenburg.
E' stata fondata nel 1891, attualmente è composta da 1200 impiegati altamente qualificati in moltissime attività di cui se ne riportano solo alcune:
- Progettazione e costruzione di edifici industriali, commerciali, scolastici, sportivi.
- Costruzione e montaggio di strutture prefabbricate quali edifici e ponti.
- Posa di tubazioni onshore e offshore, realizzazione di attraversamenti con minitunnelling e tecniche tradizionali.
- Costruzione di acquedotti, impianti di trattamento e petrolchimici.