

Paper n° 4

COSTRUZIONE DI MICROTUNNEL AD ELEVATA LUNGHEZZA E COPERTURA IN FORMAZIONI COESIVE: SFIDE, MISURE DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO E LEZIONI APPRESE

Antonio Guerini, Yuri Picco, Mara Tonelli, Silvia Del Bianco¹

¹ I.CO.P. S.p.A. Società Benefit

1. INTRODUZIONE

Nell'ultimo decennio, la crescente attenzione verso la tutela e la gestione sostenibile dell'ambiente ha influenzato in modo significativo le scelte autorizzative e progettuali. In tale ambito, le tecnologie trenchless si configurano come una soluzione privilegiata per il superamento di aree sensibili, grazie alla loro capacità di ridurre in modo sostanziale gli impatti delle opere sul territorio, sia in fase costruttiva che durante la successiva gestione.

Tra le varie tecniche trenchless, il microtunnelling si è progressivamente affermato come una delle più efficaci per la realizzazione di tracciati complessi, sia dal punto di vista geometrico che geotecnico. L'esperienza e lo sviluppo tecnologico hanno portato ad un progressivo incremento della difficoltà delle opere proposte e realizzate, ampliando il campo di applicazione della metodologia.

Il presente articolo illustra una delle recenti sfide tecniche nelle quali la tecnologia del microtunnelling è stata impiegata, con buoni risultati, per la posa di tubazioni in situazioni particolarmente complesse. Si analizza un caso studio relativo alla costruzione di tre microtunnel in terreni coesivi, con coperture significative. Tali condizioni pongono elevati rischi costruttivi, dovuti ai fenomeni di clogging, swelling e squeezing, che possono causare il blocco della perforazione e rendere impossibile il completamento dell'opera.

Attraverso un approccio multidisciplinare, che ha integrato lo studio specialistico del contesto geotecnico, sono state elaborate modalità progettuali ed operative mirate per la mitigazione dei principali rischi. Le indagini geognostiche approfondite e la modellazione geotecnica hanno fornito il supporto tecnico necessario per orientare le scelte ingegneristiche ed esecutive; questo metodo integrato si è rivelato essenziale per affrontare con successo condizioni di scavo particolarmente complesse.

2. INQUADRAMENTO DEL PROGETTO

I microtunnel oggetto del presente caso studio sono stati realizzati nell'ambito della costruzione del nuovo gasdotto "Rifacimento Metanodotto Recanati-Chieti" per SNAM Rete Gas; il progetto complessivo si articola in quattro lotti comprendenti la posa di una condotta DN 650mm (26") della lunghezza di 153,495 km.

I tre attraversamenti appartengono al terzo lotto, che si sviluppa dal Comune di Colonnella al Comune di Pineto, percorrendo la regione Abruzzo da nord a sud per 35,620 km. Data la conformazione morfologica dei territori interessati, caratterizzata dalla presenza di dossi e rilevati con potenziale rischio frana, la Committente ha previsto, nel solo lotto 3, la realizzazione di n.11 attraversamenti con microtunnel, di diametro interno variabile tra 1,6 a 2,4m, e lunghezze comprese da 400m a 1100m.

Le principali caratteristiche dei microtunnel, come da progetto esecutivo elaborato dalla Committente, sono riassunte in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche degli attraversamenti

Microtunnel	Mazzocco	Maggi	Colonnella 2
Ubicazione	Roseto degli Abruzzi	Mosciano Sant' Angelo	Colonnella
Tipo di attraversamento	rilievo collinare	dorsale	rilievo collinare
Lunghezza	762 m	1068 m	831 m
Diametro interno	2,0 m	2,4 m	2,0 m
Copertura massima	66 m	45 m	35 m
Raggio di curvatura	R _{verticale} = 1200 m R _{orizzontale} = 1200 m	R _{verticale} = 1800 m R _{orizzontale} = ∞	R _{verticale} = 1500 m R _{orizzontale} = ∞
Formazione geologica / terreni attraversati	Formazione di Mutignano: FMTa - Argille e argille marnose, con intercalazioni sottili di sabbie fini e limi	Formazione di Mutignano: FMTa - Argille e argille marnose, con intercalazioni sottili di sabbie fini e limi	Formazione di Mutignano: FMTa - Argille e argille marnose, con intercalazioni sottili di sabbie fini e limi FMTc – limi sabbiosi con intercalazione di sabbie

Sono stati individuati i seguenti fattori critici:

- Scavo quasi integralmente sviluppato in argille plastiche, dure, e scarsamente permeabili;
- Lunghezze superiori a 500m;
- Coperture di terreno elevate.

In questo contesto geo-morfologico, si è ritenuto necessario condurre un'analisi puntuale dei fenomeni che possono portare ad una riduzione significativa del sovrascavo, con il conseguente insorgere di uno stato di pressioni sul rivestimento che, in casi particolari, può portare al blocco dell'avanzamento. I fenomeni che sono stati analizzati sono: lo squeezing, o convergenza del cavo, lo swelling, o rigonfiamento dovuto al comportamento delle argille in presenza di acqua, e il clogging, ovvero la tendenza delle argille ad incollarsi agli utensili.

L'attenta valutazione preliminare e quantitativa di tali fenomeni è stata essenziale per affrontare il processo di costruzione in modo consapevole, individuando e mettendo in atto appropriate strategie di mitigazione.

3. ANALISI DEI RISCHI COSTRUTTIVI

3.1. Approfondimento del quadro conoscitivo

Le potenziali criticità nell'esecuzione degli attraversamenti in oggetto hanno reso necessario un approfondimento del quadro conoscitivo del sottosuolo volto a definire i parametri geotecnici rappresentativi necessari per le successive valutazioni.

Per ogni attraversamento, sono stati realizzati n.2 sondaggi geognostici integrativi a carotaggio continuo, spinti fino alle quote di perforazione, e aventi quindi profondità variabili da 40m a 75m. Durante l'esecuzione di tali sondaggi sono stati prelevati campioni indisturbati e rimaneggiati di terreno da analizzare in laboratorio per determinare i seguenti parametri:

- Caratteristiche fisiche: contenuto d'acqua, densità, indice dei vuoti, grado di saturazione;
- Granulometria e limiti di Atterberg;
- Consistenza e resistenza a compressione in condizioni non drenate, determinata indirettamente attraverso prove con penetrometro tascabile (PP) e direttamente con scissometro manuale (PVST);
- Resistenza al taglio e deformabilità, tramite prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL, UCS), prove di taglio diretto (TD) e prove triassiali consolidate non drenate (TRX-CIU);
- Compressibilità, attraverso prove edometriche (EDO);
- Pressione di rigonfiamento, mediante l'esecuzione delle prove di rigonfiamento Huder Amberg (HA).

Per una maggiore rappresentatività della caratterizzazione geotecnica, sono stati esaminati congiuntamente i dati forniti dalle indagini integrative e da quelle pregresse sui 3 microtunnel in oggetto e le informazioni disponibili relativamente ad altri attraversamenti situati nella stessa Formazione di Mutignano.

Ad integrazione delle prove di laboratorio, sono stati esaminati anche i risultati di prove penetrometriche statiche (CPT) e di prove pressiometriche (PMT).

I risultati delle indagini hanno evidenziato un contesto geologico caratterizzato dalla presenza di argille a plasticità media, con consistenza dura (solido-plastica) e molto dura (semisolido-solido). Il contenuto di acqua naturale w [%] è mediamente compreso nell'intervallo 18-24 %; il grado di saturazione S [%] è generalmente > 85 % e, per la maggior parte dei casi, < 100 %. Si è osservata, per tutti i campioni, una netta tendenza all'aumento della resistenza con la profondità. Inoltre, sono state evidenziate pressioni di rigonfiamento medio elevate a deformazione impedita, e deformazioni dell'ordine del 3-5% a deformazione libera.

È stata quindi confermata l'elevata criticità del contesto geologico, in virtù della quale si è ritenuto necessario eseguire un calcolo geotecnico sullo stato tensionale e deformativo del cavo per analizzare quantitativamente i principali rischi associati alla perforazione in formazioni coesive e verificare la stabilità dello scavo a breve e lungo termine, sulla base dei modelli geologici-geotecnici di riferimento elaborati per ciascun microtunnel.

Per analizzare le condizioni al fronte di scavo sono stati utilizzati modelli assialsimmetrici che simulano l'avanzamento progressivo del tunnel, con 30 step di 1m di lunghezza. Dall'input bidimensionale dei dati si ottiene un modello tridimensionale simmetrico rispetto all'asse del microtunnel.

Consapevoli del fatto che la convergenza delle argille cresce con la profondità, ovvero con lo stato tensionale iniziale, si è deciso di ottimizzare i profili di progetto degli attraversamenti, puntando a una riduzione delle elevate coperture di terreno, considerando questa una prima, fondamentale, strategia di mitigazione del rischio. Le modifiche hanno tenuto conto dei vincoli autorizzativi e costruttivi quali, ad esempio, l'estensione dei movimenti franosi nei versanti da attraversare. Le profondità sono state ridotte di circa il 20% in tutti e tre i casi studio, raggiungendo valori compresi tra 28m e 52m. Per maggiori dettagli, si rimanda al successivo paragrafo 4.1.1.

3.2. Valutazione del rischio squeezing (convergenza del cavo)

Il primo fenomeno analizzato è la convergenza del cavo, nota anche come "squeezing", che consiste nella deformazione elasto-plastica delle pareti dello scavo verso l'interno del foro. Tale deformazione può assumere valori elevati e aumenta con il passare del tempo. Tra i fattori che favoriscono il fenomeno, si ricordano: un elevato indice di plasticità dell'argilla, significativi carichi geostatici (es. per grandi coperture di terreno), la presenza di acqua interstiziale in eccesso.

I rischi associati allo squeezing consistono principalmente nell'incremento delle spinte necessarie all'avanzamento e nella sollecitazione anomala del rivestimento del tunnel, che può fessurarsi e/o ovalizzarsi.

Le analisi relative al rischio squeezing sono state condotte in due scenari: condizioni non drenate e drenate.

Le prime si esplicano nel breve termine, nei terreni a bassa permeabilità e per velocità di scavo sostenute, ovvero in assenza di rallentamenti e fermi macchina. Nel microtunneling le condizioni non drenate si registrano sul fronte scavo durante il normale avanzamento e lungo il sovrascavo nel breve periodo.

Le condizioni drenate si esplicano invece nel lungo termine, a seguito della dissipazione degli eccessi di pressione neutra generatesi durante il periodo iniziale a comportamento non drenato. Questo effetto, nella metodologia del microtunneling, interessa il sovrascavo nel lungo periodo o, meno frequentemente, il fronte scavo nel caso di fermi prolungati.

L'aspetto più critico riguarda l'overcut (sovrascavo) nel quale, la potenziale progressiva chiusura del foro e/o lo sviluppo di sovrappressioni sul rivestimento, possono incrementare notevolmente gli attriti e contrastare il movimento fino al potenziale blocco.

Per ciascun attraversamento è stata esaminata la sezione più critica, ovvero a copertura maggiore, e, per i due microtunnel con profondità più elevate (Maggi e Mazzocco), anche delle sezioni intermedie significative. Inoltre, sono state valutate due casistiche, una in presenza di una contropressione applicata alle pareti dello scavo, variabile tra 0,5 e 1,5 bar, e l'altra in sua assenza. Tale pressione ha lo scopo di limitare, in linea teorica, l'effetto di convergenza del materiale in condizioni drenate.

I risultati, sintetizzati in Tabella 2, consentono di valutare il fattore di rischio squeezing in funzione del rapporto tra lo spostamento radiale massimo atteso ed il raggio di scavo del microtunnel. Per ogni combinazione sono stati riportati i valori inerenti al caso più critico.

Tabella 2. Valutazione del rischio squeezing

SQUEEZING						
MT	Copertura [m]	Pressione [bar]	Spostamento radiale [m]	Rapporto spostamento radiale / raggio di scavo [%]	Livello di rischio (rif. HOEK AND MARINOS)	Contatto pareti scavo / tubi in c.a.
MAGGI	CONDIZIONI NON DRENATE					
	35	0	0.0495	3.8%	ALTO	PARZIALE
		1.5	0.0309	2.4%	BASSO	NO
	25	0	0.038	2.9%	ALTO	NO
		1	0.0208	1.6%	BASSO	NO
	CONDIZIONI DRENATE					
	35	0	0.1175	9.1%	MOLTO ALTO	Si
		1.5	0.0216	1.7%	BASSO	NO
	25	0	0.081	6.3%	MOLTO ALTO	Si
		1	0.0189	1.5%	BASSO	NO
MAZZUCCO	CONDIZIONI NON DRENATE					
	52	0	0.066	5.0%	ALTO	Si
		1.5	0.0546	4.2%	ALTO	PARZIALE
	35	0	0.0495	3.8%	ALTO	PARZIALE
		1.5	0.0309	2.4%	BASSO	NO
	25	0	0.038	2.9%	ALTO	NO
		1.5	0.0208	1.6%	BASSO	NO
	CONDIZIONI DRENATE					
	52	0	0.178	13.7%	ESTREMO	Si
		1.5	0.0382	2.9%	ALTO	PARZIALE
	35	0	0.117	9.0%	MOLTO ALTO	Si
		1.5	0.0216	1.7%	BASSO	NO
	25	0	0.081	6.3%	MOLTO ALTO	Si
		1.5	0.0152	1.2%	BASSO	NO
COLONNELLA 2	CONDIZIONI NON DRENATE					
	28	0	0.037	2.9%	ALTO	NO
		CONDIZIONI DRENATE				
	28	0	0.095	7.3%	MOLTO ALTO	Si
0.5		0.037	2.9%	ALTO	NO	

Rapporto [%]	1.0	2.5	5.0	10	>10
Livello rischio [Hoek and Marinos]	BASSO	ALTO	MOLTO ALTO	ESTREMO	

3.3. Valutazione del rischio swelling (rigonfiamento)

Il termine "swelling" indica la tendenza di alcuni terreni argillosi ad espandersi di volume quando entrano in contatto con l'acqua o subiscono una modifica del loro stato tensionale (decompressione) per effetto della perforazione; si verifica quindi un aumento del volume di terreno, che si deforma verso l'interno dello scavo. Il fenomeno si manifesta progressivamente e lentamente, continuando anche dopo il passaggio dello scudo fresante. Ne deriva l'insorgere del rischio di intrappolamento per la macchina e dell'impossibilità di proseguire lo scavo a causa dello sviluppo di forze d'attrito non più superabili.

La valutazione del rischio swelling si è basata sulle medesime casistiche, coperture e contropressioni al fronte considerate nel paragrafo precedente ed ha tenuto conto dell'influenza dello squeezing: il verificarsi del fenomeno di rigonfiamento è infatti strettamente correlato alla capacità delle pressioni di swelling di dissiparsi. La presenza ed il mantenimento del sovrascavo consente l'espansione del terreno, favorendo la dissipazione delle pressioni mentre, in caso di contatto tra terreno e scudo/tubazioni in c.a. o di riduzione della dimensione del sovrascavo, le pressioni di swelling non riescono a disperdersi efficacemente, gravando interamente o parzialmente sul tunnel in fase di avanzamento.

In funzione della dimensione residua del sovrascavo e delle caratteristiche delle argille determinate sulla base delle prove di Huder Amberg, si calcola la pressione agente sul rivestimento del tunnel. Qualora detta sovrappressione generi un attrito tale da superare la capacità di spinta del sistema, si verifica il "rischio intrappolamento".

Tabella 3. Valutazione del rischio swelling

MT	Copertura [m]	Pressione [bar]	SQUEEZING	SWELLING
			Contatto pareti scavo / tubi in c.a.	Avanzamento
MAGGI	CONDIZIONI NON DRENATE			
	35	0	PARZIALE	OK
		1.5	NO	OK
	25	0	NO	OK
		1.5	NO	OK
	CONDIZIONI DRENATE			
	35	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
		1.5	NO	OK
	25	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
		1	NO	OK
MAZZOCCO	CONDIZIONI NON DRENATE			
	52	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
		1.5	PARZIALE	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
	35	0	PARZIALE	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
		1.5	NO	OK
	25	0	NO	OK
		1.5	NO	OK
	CONDIZIONI DRENATE			
	52	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
		1.5	PARZIALE	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO
35	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO	
	1.5	NO	OK	
25	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO	
	1.5	NO	OK	
COLONNELLA 2	CONDIZIONI NON DRENATE			
	28	0	NO	OK
		0.5	NO	OK
	CONDIZIONI DRENATE			
28	0	Si	RISCHIO INTRAPPOLAMENTO	

3.4. Valutazione del rischio clogging

Il "clogging" è la tendenza delle argille di aderire alle superfici meccaniche dello scudo fresante, in particolare alla testa, agli utensili ed alle pareti della camera di scavo. Il fenomeno è favorito dalla mineralogia del terreno, dall'alta plasticità dell'argilla e da un ottimale contenuto d'acqua del terreno, tale da renderlo appiccicoso ma non così fluido da scivolare. Le possibili conseguenze del clogging consistono nella difficoltà ad evacuare il terreno di scavo ed all'intasamento del cono della testa fresante, nell'aumento della coppia necessaria alla sua rotazione, nell'usura irregolare degli utensili di scavo.

Il fenomeno è stato approfondito mediante l'analisi dei risultati delle prove di laboratorio sui campioni di terreno: in particolare, sono stati esaminati gli indici di consistenza I_c ed indici di plasticità I_p , la cui interpolazione seguendo il metodo di Thewes permette di valutare graficamente l'intensità del rischio clogging (Figura 1).

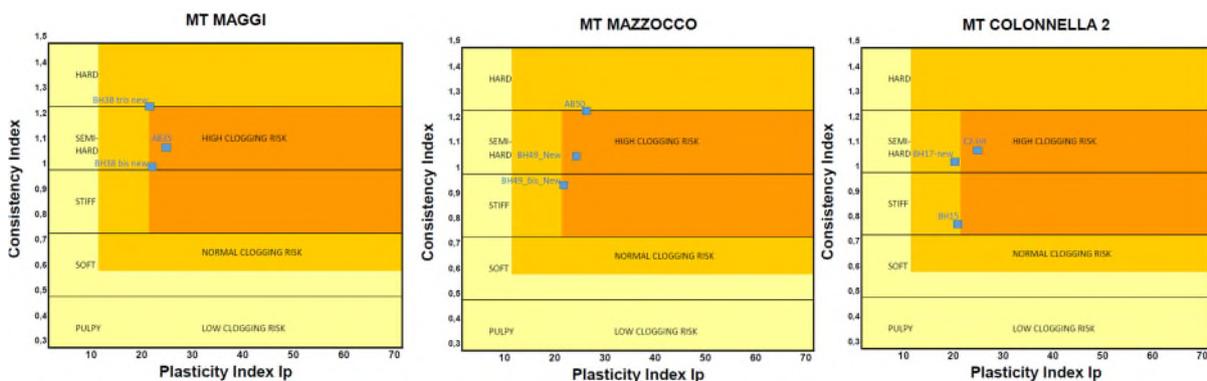


Figura 1. Valutazione grafica del rischio clogging secondo Thewes.

Ad ulteriore conferma di quanto sopra esposto lo studio geotecnico condotto ha analizzato le due formazioni geologiche prevalenti (FMTc ed FMTa) mediante diagramma di Holmann. Ne è emerso che entrambe le unità, nel caso in fase di scavo si verifichi un apporto del 10-15% del contenuto d'acqua, ricadono nel range di rischio elevato di ostruzione.

4. APPROCCIO PROGETTUALE ED ESECUTIVO

Alla luce dei rischi sopra evidenziati, si è adottato un approccio multidisciplinare, individuando misure di mitigazione del rischio a più livelli, progettuale ed operativo. Inoltre, è stato elaborato un piano di intervento da attuare qualora le misure non si fossero rivelate sufficienti a prevenire il blocco della perforazione.

4.1. Misure di mitigazione in fase progettuale

4.1.1. Ottimizzazione della geometria degli attraversamenti

Il primo approccio progettuale adottato è consistito nell'ottimizzare la geometria dei microtunnel, in funzione delle maggiori conoscenze acquisite sul contesto geologico-geotecnico ed i relativi rischi. In accordo con la Committenza, e tenuto conto dei vincoli autorizzativi imposti, si è intervenuti sui seguenti ambiti:

1. Modifica del profilo di perforazione e delle relative curvature, finalizzato alla riduzione delle coperture;
2. Modifica del diametro di scavo.

Microtunnel Mazzocco: per ridurre in modo significativo (14m) la copertura massima di progetto, è stato necessario studiare un profilo verticale non convenzionale a "schiena d'asino", caratterizzato da una prima curva verticale concava con $R_{vert}=1200m$ seguita da una seconda curva verticale convessa $R_{vert}=3000m$. Tali curvature si combinano con la curva planimetrica $R_{orizz}=1200m$, generando un raggio combinato tridimensionale. Per questo microtunnel, si è inoltre deciso di incrementare il diametro interno portandolo a 2,1m, in modo da poter implementare il piano di intervento descritto al capitolo 4.3. Per garantire adeguate forze di spinta ammissibili sui tubi, si è adottato un diametro esterno di 2,5m.

Microtunnel Maggi: dovendo mantenere inalterata la quota di inizio perforazione, per garantire la copertura minima necessaria sotto una strada prossima al punto di partenza, il profilo è stato ottimizzato modificando il raggio verticale in modo da ottenere una riduzione della copertura massima di 10m; contestualmente, si è riusciti a diminuire la pendenza finale, migliorando la gestione del circuito dello smarino.

Si è inoltre optato per una modifica del diametro delle tubazioni da $Di/De = 2,4/3,0m$ a $2,1/2,5m$. La scelta progettuale è volta a conciliare due opposte necessità: mitigare il fenomeno di convergenza (squeezing), che cresce all'aumentare del diametro, e avere un'adeguata spinta ammissibile sui tubi in c.a., essenziale per affrontare lunghe perforazioni come quelle in progetto.

Microtunnel Colonnella 2: il profilo è stato ottimizzato aumentando la profondità del pozzo di partenza di circa 1,5m e introducendo due curve verticali, entrambe convesse, separate da un tratto rettilineo e aventi raggi di curvatura $R_{vert}=1600m$ e $R_{vert}=1400m$. In questo modo, è stato possibile ridurre la copertura massima di 7m.

Tabella 4. Variazione delle caratteristiche degli attraversamenti a seguito dell'ottimizzazione geometrica

Microtunnel	Mazzocco	Maggi	Colonnella 2
Lunghezza	762 m	1068 m	831 m
Diametro interno	2,0m → 2,1m	2,4m → 2,1m	2,0m
Copertura massima	66m → 52m	45m → 35m	35m → 28m
Raggio di curvatura	$R_{vert} = 1200m \rightarrow 1200+3000m$ $R_{orizz} = 1200m$	$R_{vert} = 1800m \rightarrow 1300m$ $R_{orizz} = \infty$	$R_{vert} = 1500m \rightarrow 1600+1400m$ $R_{orizz} = \infty$

4.1.2. Progettazione ad-hoc della testa fresante

Le valutazioni degli impatti dei fenomeni di squeezing e swelling sono strettamente correlate alla dimensione del sovrascavo, ovvero alla differenza tra il diametro di scavo della testa fresante e il diametro esterno dei tubi. Un adeguato sovrascavo garantisce la presenza di un gap durante la fase di spinta e consente all'argilla di avere uno spazio sufficientemente libero per espandersi nel caso di rigonfiamento.

Il diametro di taglio della testa fresante utilizzata per gli attraversamenti Maggi e Mazzocco, ritenuti più critici, è stato quindi aumentato dal valore standard di $\phi=2575mm$ a $\phi=2590mm$. Tale misura è stata determinata

considerando due contrapposte esigenze: disporre di un margine ulteriore di volume ove dissipare le pressioni radiali del terreno, e rispettare le esigenze tecnico-operative di fattibilità della guida, che prediligono un sovrascavo più contenuto.

4.1.3. Installazione di un maggior numero di stazioni di spinta intermedie rispetto allo standard

La buona prassi industriale prevede l'installazione di una stazione di spinta intermedia circa ogni 100m. Per il microtunnel "Mazzocco", il più critico in termini di coperture e complessità geometrica, si è stabilito di ridurre la distanza tra le stazioni di spinta, portandola a circa 70m. Questa misura permette una migliore gestione di eventuali incrementi degli attriti, grazie a un maggiore frazionamento della colonna di spinta. Inoltre, vista la presenza di una curvatura planimetrica ed altimetrica combinata, le stazioni di spinta possono anche essere utilizzate per tenere sotto controllo la rotazione assiale dei concetti in c.a..

4.2. Misure di mitigazione in fase esecutiva

Le misure di mitigazione applicate a livello esecutivo/operativo, per ridurre ulteriormente il rischio rispetto a quanto già ottenuto grazie all'implementazione delle misure progettuali descritte al paragrafo precedente, hanno riguardato tre ambiti principali:

- la modalità di lubrificazione del sovrascavo;
- il controllo dei parametri del fluido di scavo;
- la continuità delle attività di perforazione con l'impiego di turni di lavoro.

4.2.1. La lubrificazione

Si è intervenuti sul "mix design" del fluido di lubrificazione, utilizzando una miscela bentonitica estesa con l'impiego di polimeri inibitori delle argille. Questi polimeri hanno la funzione di formare un rivestimento protettivo sulla superficie delle particelle di argilla, limitando l'accesso all'acqua e inibendone l'idratazione. Ciò riduce il rigonfiamento delle argille e la loro espansione nel sovrascavo. Al tempo stesso, questi polimeri contribuiscono a ridurre gli attriti, favorendo la lubrificazione tra tubi e terreno.

L'analisi teorica della convergenza del cavo nelle condizioni di progetto ha evidenziato come l'applicazione di una contropressione al fronte di scavo sia efficace nel ridurre il rischio di squeezing. Per sfruttare tale beneficio, sono state adottate due misure operative: l'applicazione di una contropressione meccanica sul fronte di scavo leggermente maggiore rispetto allo standard e, limitatamente ai tratti a maggiore copertura (oltre i 25m), il mantenimento di una leggera sovrappressione del fluido di lubrificazione nel sovrascavo per contrastarne la chiusura.

4.2.2. Il fluido di scavo

Nel microtunneling a smarino idraulico, il principio di scavo si basa sull'utilizzo di un fluido che assolve una duplice funzione: sostenere il fronte di scavo tramite il bilanciamento idraulico delle pressioni e fungere da mezzo di trasporto per l'evacuazione del terreno disgregato dalla testa fresante. L'impiego di miscele a base acquosa è quindi un elemento imprescindibile di questa tecnologia. Inoltre, l'iniezione di fluido nella camera di scavo tramite ugelli a media pressione (8 bar circa) facilita la rimozione del terreno dalle superfici della camera, prevenendone l'intasamento. Nel contesto in esame, caratterizzato dalla predominanza di argille plastiche, dove i temi di stabilità del fronte di scavo e di capacità di mantenere il materiale solido in sospensione sono meno critici, si è ritenuto opportuno privilegiare l'efficacia della pulizia della camera di scavo, per mitigare il rischio di clogging. A tale scopo, è stato utilizzato un fluido di scavo a densità controllata (1,03-1,10 kg/l) operando in modo da mantenere il contenuto solido su valori minimi. Al tempo stesso, per non alimentare il fenomeno del rigonfiamento delle argille, le portate di mandate e ritorno del fluido di scavo sono state gestite in modo da apportare la minima quantità possibile di acqua al terreno.

4.2.3. Gestione dei turni di lavoro

È stata adottata un'organizzazione dei turni di lavoro e delle relative rotazioni che ha consentito di lavorare 24 ore su 24 e 7 giorni su 7 in modo da limitare le interruzioni del processo di scavo e favorire un avanzamento continuo e regolare della perforazione. Questo ha un duplice scopo:

- ridurre significativamente i tempi di esecuzione, per evitare che si verifichi la transizione da condizioni non drenate a drenate e che si perda l'effetto positivo della sovrappressione di iniezione che, nei periodi di fermo, tende ad esaurirsi;
- prevenire gli incrementi degli attriti che tipicamente si riscontrano – soprattutto in argilla – alla ripartenza dopo soste, più o meno prolungate della perforazione (fenomeno legato al passaggio da condizioni non drenate a drenate ed all'assestamento per peso proprio della colonna di tubi all'interno del sovrascavo).

4.3. Piano di intervento in caso di arresto dell'avanzamento a spinta

Dopo aver identificato le possibili misure di mitigazione, progettuali ed esecutive, da implementare per ridurre il rischio costruttivo, è stata esaminata l'eventualità che – nonostante tutte le misure introdotte – si verificasse comunque un evento tale da rendere impossibile il completamento dei microtunnel con posa a spinta.

Per affrontare tale scenario, è stato studiato un piano di intervento basato sull'impiego di una macchina di scavo retraibile, ovvero una macchina che potesse essere recuperata dall'interno del tunnel, per poi completare l'opera con altra tecnologia trenchless a partire dal punto d'uscita. Tale piano è stato implementato per i due microtunnel caratterizzati dal maggiore livello di rischio: il Mazzocco e il Maggi.

Anziché utilizzare una TBM avente lo stesso diametro esterno dei tubi da posare (DE=2,5m), è stata impiegata una macchina di diametro inferiore pari a ca. 1,97m dotata di extension kit per arrivare a DE=2,5m. Inoltre, il diametro nominale dei tubi (DI=2,1m) è stato individuato in modo che la macchina potesse scorrere al loro interno ed essere così recuperata in caso di blocco.

La macchina retraibile è costituita da due elementi. Il primo elemento – lo scudo di perforazione – è stato equipaggiato con un guscio esterno a perdere ed una testa fresante composta da una parte centrale, solidale alla macchina, e da una corona circolare esterna, smontabile a pezzi. Il secondo elemento – contenente il power pack – è stato invece posizionato all'interno del primo tubo in c.a., collocato su una slitta per allinearli al primo elemento e dotato di un sistema antirollio a contrasto sul tubo.



Figura 2. Macchina retraibile: schema (sin); inserimento del primo elemento nel guscio (centro); testa fresante con identificazione della parte centrale solidale al primo elemento (dx)

In caso di blocco della perforazione, la macchina può essere smontata e movimentata nel tunnel fino al pozzo di partenza dove viene recuperata. La sequenza di recupero prevede lo smontaggio di tutte le linee e servizi installati all'interno del tunnel, la sconnessione delle parti removibili della testa e dello scudo di perforazione, e l'estrazione – in sequenza – dei due elementi della macchina, facendoli scorrere verso il pozzo di partenza tramite un opportuno sistema di tiro.

Al termine delle operazioni sopra descritte, nel terreno rimangono il guscio metallico all'interno del quale era inserito il primo elemento e i tubi in calcestruzzo armato. Il fronte si presenta aperto.

Per completare l'attraversamento, sarà necessario eseguire uno scavo a partire dal punto di arrivo, andando a congiungersi con la porzione di opera già realizzata. Ad esempio, è possibile installare direttamente la condotta di

linea eseguendo una Trivellazione Orizzontale Controllata o un'installazione con Direct Steerable Pipe Thrusting il cui tracciato termini all'interno del microtunnel, o un altro microtunnel retrattile.

Nel caso specifico si è preferito inoltre la macchina retraibile rispetto ad un sistema con avanzamento a segmental lining per i seguenti motivi:

- Elevati tempi e costi per la costruzione di una macchina mediante segmental lining incompatibili con le esigenze della Committente;
- Il maggiore diametro necessario per installare il push module avrebbe incrementato il rischio di blocco per il comportamento geomeccanico delle argille;
- La complessità geometrica dei due attraversamenti li rendeva non realizzabili con una macchina a conci standard (idonea per pendenze fino a 4%);
- Le aree cantiere disponibili presentavano elevate criticità per l'applicazione del segmental lining.

5. ESECUZIONE DEL LAVORO

I lavori di costruzione dei tre microtunnel sono stati eseguiti nella seconda metà del 2024, tra luglio e dicembre. Gli attraversamenti sono stati completati con successo e non è stato necessario ricorrere al piano di intervento per blocco dell'avanzamento a spinta, a testimonianza dell'efficacia delle misure adottate.

I principali dati relativi allo scavo sono riassunti nella tabella seguente.

Tabella 5. Dati relativi all'esecuzione dei microtunnel

Microtunnel	Lunghezza as built (m)	Durata scavo (gg solari)	Produzione media (m/gg solare)	Spinta finale (ton)	Attrito medio unitario (ton/m2)
Mazzocco	762	41	18,6	660 ca.	0,088
Maggi	1077	72	15,6	760 ca.	0,065
Colonnella 2	830	43	19,3	1070 ca.	0,107

Per tutti gli attraversamenti, l'evoluzione degli attriti e, conseguentemente, della forza di spinta durante la costruzione, è stata regolare; i valori di spinta sono aumentati gradualmente, senza particolari anomalie. Anche l'utilizzo delle stazioni di spinta intermedie è stato estremamente limitato e associato a particolari situazioni occorse durante la perforazione, come dettagliato nel seguito; non è invece stato necessario un loro sistematico impiego per l'avanzamento.

Nel corso della costruzione del microtunnel "Mazzocco", le stazioni intermedie sono state impiegate tra le progressive 250m e 500m ca. allo scopo di controllare la tendenza del tunnel a ruotare attorno al proprio asse, indotta dalla presenza della curva planimetrica, riducendo il tratto in movimento durante la fase di scavo e limitando così la torsione indotta dalla testa stessa sui tubi.

Durante l'esecuzione del microtunnel "Colonnella 2", raggiunti i 520m di progressiva, si sono verificate due interruzioni consecutive, entrambe di durata inferiore ad alcuni turni di lavoro, dovute a manutenzioni straordinarie di alcune attrezzature. Alla ripresa del processo di scavo, si è riscontrato un elevato incremento degli attriti nei primi 250m del microtunnel che ha portato a un valore di spinta di ca. 1100t, quasi doppio rispetto ai valori medi registrati prima dello stop. Inizialmente, per favorire la ripartenza, si è utilizzata la stazione di spinta intermedia posizionata circa 230m dietro alla TBM; le spinte sono poi rapidamente diminuite, senza che si riuscisse tuttavia a riportarle sui livelli originari. Il tunnel è stato completato con valori di spinta dell'ordine di 1000-1100t. Questo è l'attraversamento nel quale si è registrato il maggiore attrito medio unitario, dovuto alla parte di incremento della spinta indotta dall'interruzione dello scavo che non è stato possibile recuperare.

Anche in fase di costruzione del microtunnel "Maggi", attorno alla progressiva 830m, è stato necessario interrompere il processo di scavo per un'intera giornata a causa della sostituzione di un componente del sistema di separazione danneggiatosi. Al momento della ripartenza, si è registrato un brusco incremento della forza di

spinta – da circa 600t a circa 1000t. Nei successivi 70m, si è riusciti a riportare i valori di spinta sui livelli antecedenti alla sospensione e, successivamente, l'incremento della spinta è stato regolare.

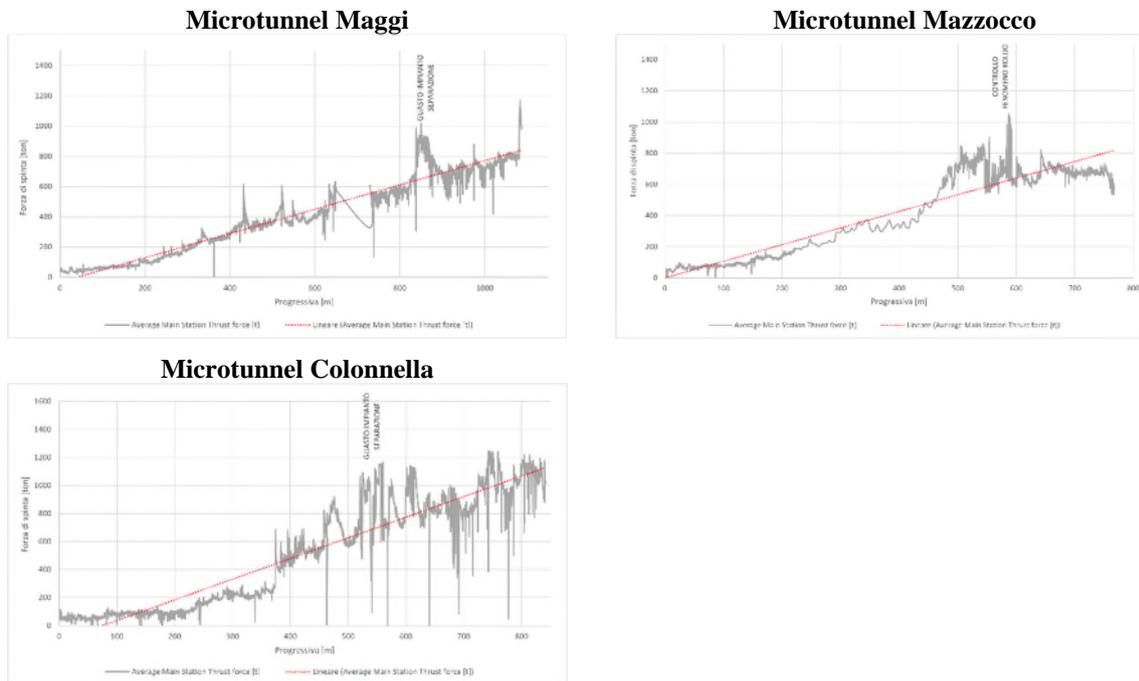


Figura 3. Grafici delle spinte

6. CONCLUSIONI

I tre attraversamenti sono stati completati con esito positivo, senza la necessità di attivare il piano di emergenza operativo, e nel pieno rispetto delle tempistiche contrattuali. L'attenta pianificazione delle operazioni, unitamente alla progettazione e implementazione di efficaci misure di mitigazione, ha consentito di mantenere sotto controllo le forze di spinta, rendendo possibile l'esecuzione degli attraversamenti mediante la sola spinta esercitata dal pozzo di avvio.

L'esperienza maturata conferma pertanto che l'utilizzo della tecnica del microtunneling in situazioni complesse è possibile ma necessita di una consapevolezza iniziale del rischio esecutivo e delle misure di riduzione da adottare in fase di progettazione e di costruzione. La verifica del comportamento del sovrascavo e dello stato tensionale indotto, tipica nello studio delle gallerie a grande diametro, si è mostrata uno strumento efficace per la valutazione quantitativa del rischio di blocco dell'avanzamento nel caso di posa di tubi a spinta.

7. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano la Committente Snam Rete Gas, l'Appaltatore Sicim, l'ingegnere Moreno Pescara della società TYLIN e l'azienda Palmieri.

8. REFERENZE

Hoek, E. and Marinos, P. (2000), *Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses*. Tunnels and Tunneling International, Part 1, 32(11), 45-51; Part 2, 32(12), 33-36.

Thewes, M. (1999), *Adhesion of clay soil during tunneling with liquid shields*, PhD Thesis, University of Wuppertal.