



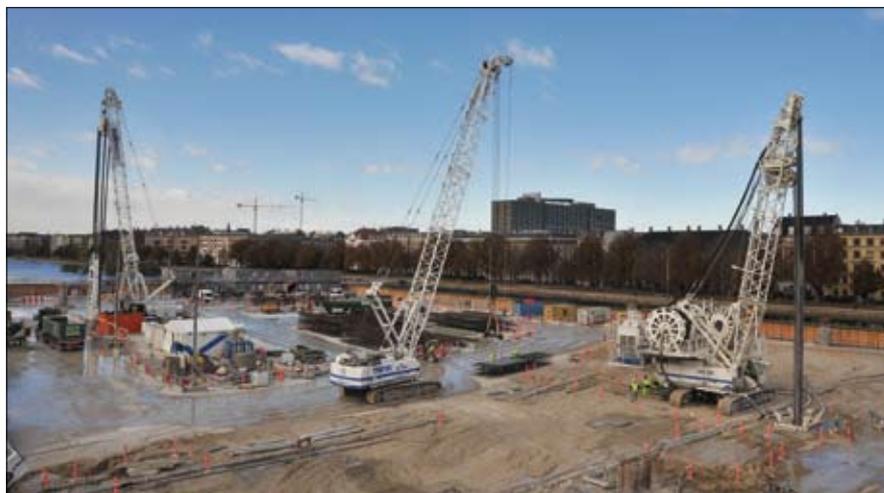
Il progetto Cityrigen di Copenhagen

La capitale danese vanta il più evoluto sistema di mobilità pubblica in Europa. Il progetto Cityrigen realizzerà il nuovo "anello" della metropolitana nel centro cittadino. Qui il Gruppo di Cesena sta lavorando in sinergia con Soilmec in 21 cantieri ed è responsabile della progettazione e costruzione dei muri permanenti di supporto di tutte le stazioni e dei centri di scambio

Il progetto Cityrigen prevede la realizzazione del nuovo "anello" della metropolitana di Copenhagen, caratterizzato dalla presenza di due lunghi tunnel e di 17 nuove stazioni, situate a circa 30 m di profondità dal piano stradale. La linea, completamente automatizzata, funzionerà 24 ore su 24, con intervalli minimi tra i convogli di appena 100 secondi, e garantirà la mobilità di

130 milioni di passeggeri l'anno. Per questo motivo il progetto rappresenta una rilevante sfida tecnica per la sua complessità e importanza.

I vari siti interessati dai cantieri sono degni di nota anche per la particolare posizione topografica, incuneati come sono tra edifici residenziali, strade (spesso strette) e palazzi storici. E in molti di questi luoghi, negli ultimi due anni, gli abitanti della capi-



Con il progetto Cityrigen, la capitale danese realizzerà il nuovo anello della linea metropolitana nel centro stesso della città, con due tunnel e 17 nuove stazioni situate a 30 m di profondità dal piano stradale

tale danese hanno visto all'opera un gran numero di macchine da palo e idrofresa Soilmec, che hanno giocato un ruolo fondamentale nella costruzione della nuova linea metropolitana.

Espansione sotterranea

L'espansione della metropolitana di Copenaghen prevede la costruzione di due tunnel gemelli di circa 15,5 km: essa circonda il centro della città e conterà in totale 17 stazioni e quattro centri di scambio, posti a una profondità compresa tra i 28 e i 45 m. Il progetto comprenderà inoltre scambi diretti con la linea metropolitana già esistente, allo scopo di collegare aree non raggiungibili dalla rete attuale e dal servizio "S-trains" di superficie.

Circa 250 dipendenti Trevi stanno lavorando in 21 cantieri distinti, gestiti dall'iniziativa imprenditoriale congiunta denominata CMT (Cityringen Metro Team); nella fattispecie, Trevi è responsabile della costruzione dei muri permanenti di supporto di tutte le stazioni e dei centri di scambio.

I muri strutturali per le stazioni della metropolitana includono una combinazione di diaframmi eseguiti tramite idrofresa e muri di pali secanti (*Cased Secant Piles*). Il CSP è stato scelto nelle circostanze in cui il muro non superava i 28 m; i diaframmi eseguiti con idrofresa, invece, sono stati ritenuti una soluzione più adeguata in occasione delle profondità maggiori, ossia dai 28 ai 45 m circa. Dopo il completamento dei muri strutturali, una fresa meccanica a piena sezione - o TBM (Tunnel Boring Machine) - scaverà un doppio tunnel, attraversando i muri perimetrali delle stazioni in coincidenza dei diaframmi in vetroresina posti nei lati corti delle gabbie in calcestruzzo per collegare le varie stazioni.

Una sfida costruttiva

Trevi sta incontrando (e gestendo) diverse sfide costruttive nei cantieri del progetto Cityringen. Una di queste si riferisce certamente alla condizione del sottosuolo: esso, infatti, è caratterizzato da una stratigrafia che vede la presenza di trovanti di granito e "flint" (selce) - con dimensione variabile tra i 30 e i 100 cm - negli strati argillo-



Il progetto Cityringen rappresenta una sfida tecnica per la sua complessità e importanza. Circa 250 dipendenti Trevi stanno lavorando in 21 cantieri distinti

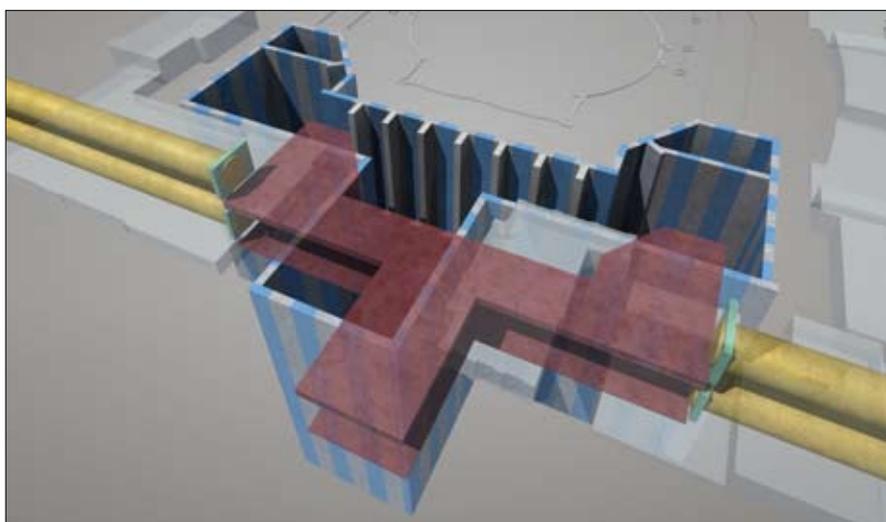
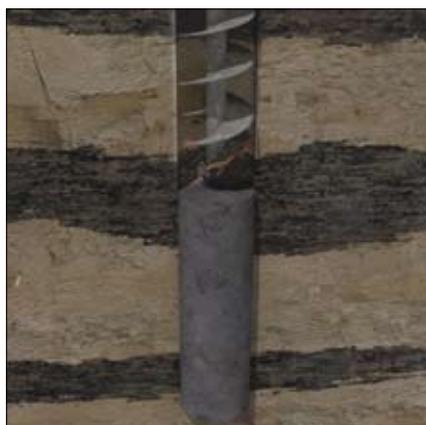
mosi di origine alluvionale e glaciale, sotto cui si trova un banco calcareo all'interno del quale, a sua volta, si registrano strati intermittenti di selciti estremamente duri, con uno spessore che varia da pochi centimetri a qualche metro. In aggiunta alle condizioni del sottosuolo, le ordinanze della città di Copenaghen impongono condizioni ferree ai cantieri, inclusa una lista di restrizioni relative a rumori, emissioni, vibrazioni e ore di lavoro, nonché naturalmente all'ambiente.

Il (densamente abitato) centro storico di Copenaghen, inoltre, offre pochissime aree libere da costruzioni e, come accennato, i lavori procedono in prossimità di palazzi e

strutture già esistenti. Un esempio? I muri perimetrali della stazione "Marmorkirken" si trovano a soli 100 mm di distanza dalle fondamenta della Frederiks Kirke, una delle più importanti chiese della città, caratterizzata dalla più grande cupola di tutta la Scandinavia (probabilmente ispirata a quella di San Pietro a Roma), con un diametro di 31 m e retta da 12 colonne.

Un'opportunità per l'innovazione

Il Parlamento europeo ha adottato, nel 2004, delle norme più restrittive rispetto al passato per ciò che concerne le fasi di emissione III e IV, relativamente ai motori "non stradali". Le normative relative



Da sinistra, rendering relativi a: tecnologia idrofresa, CAP/CSP e stazione di Marmorkirken

ai propulsori Tier IV, in particolare, sono entrate in vigore all'inizio di quest'anno ed è utile evidenziare come le ordinanze riguardanti la città di Copenhagen siano ancora più restrittive di quelle europee in generale. Per questo motivo, fin dall'inizio dei lavori è stato richiesto a Trevi di utilizzare equipaggiamenti Tier IV per il progetto Cityringen.

Soilmec, che si stava organizzando per questa tappa fondamentale da più di due anni, ha colto quest'importante opportunità per "reinventare" completamente la propria linea di prodotti, garantendo la fornitura di macchine adeguate alle nuove esigenze. E in quest'ultimo periodo gli ingegneri dell'azienda di Cesena hanno avuto la possibilità di lavorare al fianco del personale di cantiere Trevi presente in loco, risolvendo i problemi emersi nel corso degli interventi e ottimizzando la nuova gamma di macchine perforatrici: il risultato è che non solo le nuove appa-

recchiature soddisfano i requisiti richiesti, ma offrono ancora maggiore potenza, efficienza e flessibilità.

Le tecnologie adottate

Nel progetto Cityringen l'esecuzione del diaframma di una parete tramite idrofresa prevede la realizzazione di pannelli primari a una profondità fino a 45 m, ai quali si sovrappongono dei pannelli secondari spinti fino alla medesima distanza (un singolo pannello ha solitamente dimensioni pari a 1,2 m di larghezza e 2,8 m di lunghezza).

Durante la realizzazione di ognuno dei diaframmi sono utilizzati fanghi bentonitici per stabilizzare le trincee; una volta raggiunta la profondità stabilita, vengono calate le gabbie di armatura in acciaio atte a rinforzare il muro; successivamente vengono riempite le trincee con calcestruzzo, tramite turbogetto.

Per la sovrapposizione dei pannelli, Trevi

ha scelto di utilizzare una tecnica brevettata denominata "Giunto Milano": essa consiste in una serie di tubi in PVC collocati sulle gabbie dell'armatura, alle estremità di ogni pannello; durante lo scavo del secondo pannello, i tubi in PVC vengono distrutti e le superfici articolate vengono scalfite e pulite (i due pannelli, in pratica, vengono giuntati l'uno all'altra come degli elementi di un puzzle, ndr). Questa tecnica riduce la contaminazione di bentonite grazie al taglio del cemento, garantendo un'ottimale sovrapposizione e tensione dell'acqua tra i pannelli stessi.

Nella fattispecie, i muri del diaframma realizzato a Copenhagen sono stati costruiti utilizzando principalmente una gru cingolata Soilmec SC-120 allestita con idrofresa Cougar e con motore Cat C27 al posto del propulsore "standard" C18, al fine di garantire la maggiore potenza possibile per tagliare la roccia presente nel sito. E, sempre per l'occasione, Trevi ha sviluppato un impianto Soilmec di trattamento dei fanghi bentonitici compatto e chiuso, utilizzato per separare il fango e preparare i residui di lavorazione.

Da citare il fatto, infine, che i cantieri di alcune stazioni presentano un'estensione talmente ridotta che Trevi, per ottimizzare gli spazi, ha dislocato gli impianti di trattamento dei fanghi su vari livelli (l'impianto di nuova generazione SMT-500 utilizzato presso la citata stazione di Marmorkirken, ad esempio, è su tre livelli).

I diaframmi eseguiti con la metodologia a pali secanti sono costituiti essenzialmente da pali primari e secondari, trivellati in elica continua e incamiciati, sovrapposti in modo opportuno da formare una paratia continua. In dettaglio, per costruire un singolo palo, un'elica continua e un involucro esterno in acciaio avanzano in modo sinergico dentro il terreno, guidate da due rotary indipendenti che hanno la medesima direzione di avanzamento, ma con sensi di rotazione inversi. Contemporaneamente alla risalita il calcestruzzo viene immesso nel palo trivellato attraverso il fusto cavo dell'elica. La gabbia dell'armatura di piena lunghezza viene quindi inserita nel calce-



Panoramica di uno dei molti cantieri del progetto Cityrigen in cui Trevi e Soilmec stanno operando in modo sinergico

struzzo fresco (ogni palo, quindi, diventa una colonna di calcestruzzo rinforzata, in grado di resistere a carichi verticali e laterali).

A causa della particolare stratigrafia del terreno sotto Copenhagen, Trevi ha scelto di attuare una pre-perforazione degli strati calcarei e di selcite, al fine di raggiungere tempistiche realizzative ancora migliori. Tale operazione è di solito eseguita utilizzando un martello ad acqua ad alta pressione di tipo Wassara; nei casi in cui era presente terreno inquinato, onde evitare la contaminazione ambientale è stata adottata la soluzione alternativa della perforazione sonica. L'utilizzo di queste tecniche pre-perforazione ha permesso di raddoppiare la velocità di perforazione.

A Copenhagen, poi, gli utensili di scavo per il CSP (rivestimenti, carotaggi e trivelle) sono state adeguatamente sviluppate e migliorate per adattarle agli scavi, in modo da poter perforare agevolmente i duri strati di selce, una roccia sedimentaria altamente abrasiva. Qui Soilmec sta utilizzando un acciaio ancora più spesso e di migliore qualità rispetto al solito e ha adeguato la posizione degli utensili per creare un'elica ancora più "aggressiva" e garantire limitati episodi di rottura. Trevi, inoltre, sta usando la capacità massima di coppia della rotary in dotazione alla SR-100.

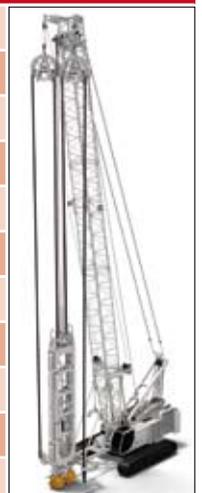
L'idrofresa Cougar

Le idrofresce Cougar utilizzate a Copenhagen sono montate su una gru cingolata della classe 120 t alimentata da un motore Cat C27 diesel da 653 kW. La macchina è dotata di un modulo fresante da 40 t in grado di eseguire pannelli in un range compreso tra 2.800 e 3.000 mm di lunghezza e tra 800-1.500 mm di larghezza, fino a una profondità di 56 m. L'unità fresante H-10 utilizzata a Copenhagen offre 102 kNm di coppia massima per ruota che, insieme alle pompe fango ad alte prestazioni da 400 m³/h di portata massima, hanno reso possibile produzioni molto elevate. Queste idrofresce possono essere equipaggiate con diver-

si optional, come il movimento simultaneo o indipendente dei tamburi fresanti o la rotazione modulo a $\pm 90^\circ$, per l'esecuzione di pannelli a "T". Questo genere di soluzione consente la realizzazione di setti di paratia con deviazioni massime dalla verticale nell'ordine dello 0,3÷0,5%, oltre che l'attraversamento di strati rocciosi con valori di resistenza UCS oltre a 200 Mpa. Consente inoltre di ottenere giunti a tenuta idraulica di affidabilità superiore rispetto a quelli utilizzati con la tecnica di scavo con benna. Le profondità raggiungibili con attrezzature standard sono nell'ordine dei 40÷80 m (con attrezzature speciali è possibile spingersi fino a 100÷150 m).

L'idrofresa Cougar

Profondità max.	56 m
Classe di peso del modulo	40.000 kg
Unità fresante	H-10
Range lunghezza pannello	2.800-3.000 mm
Range larghezza pannello	800-1.500 mm
Coppia massima per ruota fresante	102 kNm
Velocità per ruota fresante (@ 450 l/min)	21 giri/min
Motore diesel (versione Copenhagen)	Cat C27
Potenza motore	653 kW a 1.800 giri/min
Tiro argano principale al 1°strato	350 kN
Larghezza operativa (cingoli aperti)	6.300 mm





Gli ingegneri Soilmec hanno avuto la possibilità di lavorare al fianco del personale di cantiere Trevi presente in loco, risolvendo i problemi emersi nel corso degli interventi e ottimizzando la nuova gamma di macchine perforatrici

La perforatrice idraulica SR-100 CAP/CSP

La SR-100 equipaggiata in versione CAP/CSP è il fiore all'occhiello di Soilmec: appartenente alla classe di peso delle 140 t, è alimentata da un motore diesel Deutz TCD2015V8 da 480 kW ed equipaggiata con il doppio sistema indipendente di rotazione Soilmec, in grado di offrire 288 kNm

di coppia all'elica e fino a 384 kNm coppia al casing. Il sistema di tiro spinta ad argano può trasmettere una forza di spinta di 400 kN e una di estrazione pari a 1.280 kN, permettendo di raggiungere una profondità di perforazione di 28 m (di cui 21 m intubati). Una tecnologia ideale, questa, per interventi in centri urbani, in quanto elimina vibrazioni e disturbi alle strutture

adiacenti, riduce le emissioni acustiche ed evita l'utilizzo dei fanghi bentonitici di perforazione. Inoltre, comporta una semplificazione dello smaltimento del materiale di risulta. È una metodologia particolarmente efficace anche per realizzare pali secanti per la formazione di paratie continue strutturali e/o a tenuta idraulica. Con la tecnologia CSP è possibile operare in aderenza a fondazioni esistenti evitando la decompressione del terreno. L'utilizzo del rivestimento assicura un alto grado di verticalità di perforazione, con deviazione dalla verticale inferiore allo 0,7%.

Conclusioni

Copenhagen, dunque, si è dimostrata un banco di prova ideale per sperimentare e testare le nuove tecnologie Soilmec, progettate per raccogliere (e vincere) le sfide poste da uno spazio limitato in cui operare e da regole ferree imposte dalle Autorità per tutelare l'ambiente. Utilizzando queste apparecchiature Trevi ha rispettato i tempi di realizzazione prefissati, rispettando perfettamente e con successo le misure di sicurezza e le normative imposte. ■

La perforatrice idraulica SR-100 CAP/CSP

Diametro max.	1.200 mm
Profondità di scavo max.	28,6 m
Max profondità intubate	21 m
Rotary elica: coppia di taratura (nominale)	288 kNm
Rotary elica: coppia max (nominale, intermittente)	336 kNm
Velocità di rotazione max.	28,7 giri/min
Forza di estrazione max.	1.280 kN
Rotary casing: coppia di taratura (nominale)	384 kNm
Rotary casing: coppia max (nominale, intermittente)	448 kNm
Velocità di rotazione max.	11,6 giri/min
Forza di estrazione max.	400 + 440 kN
Corsa utile tra le teste di rotazione	20.600 mm
Motore (EU stage III A, EPA CARB Tier 3)	Deutz TCD2015-V08
Potenza (ISO 3046-I)	480 kW a 1.900 giri/min
Sistema di spinta sul casing (spinta/tiro)	440/440 kN
Tiro argano principale (1° strato)	370 kN
Larghezza cingoli (chiusi/aperti)	3.500/5.100 mm

