

Bologna, 17, 18 e 19 ottobre 2013

## Tecnologie di perforazione avanzate per la realizzazione di paratie con riferimento alla Circle Line di Copenhagen

M. Bringiotti<sup>(1)</sup>, M. Canepa<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>GeoTunnel S.r.l., Genoa, Italia

<sup>(2)</sup>Bauer Macchine S.r.l., Mordano, Italia

**ABSTRACT:** L'espansione della metropolitana di Copenhagen, la Circle Line della città, è in costruzione e in programma di aprire nel 2018. Sarà una linea indipendente del sistema esistente, che farà il giro del centro della città. La linea si sviluppa per 15,5 km di lunghezza ed è gestita interamente in galleria. La circonvallazione avrà 17 stazioni e ci vorranno 25 minuti per compiere una rotazione completa. La linea opererà con 2 tratte. La prima eseguirà un cerchio completo, mentre la seconda funziona solo sulla metà orientale dalla stazione centrale di Copenhagen. I treni funzionano in entrambe le direzioni attraverso il cerchio. La linea è stimata per portare 240.000 passeggeri al giorno, portando l'utenza giornaliera totale della metropolitana a 460.000. L'esigenza di costruire numerosi pozzi e le condizioni geologiche hanno portato anche all'impiego della tecnologia dei pali secanti per realizzare paratie di sostegno compatte e resistenti e, nello stesso tempo, geometricamente perfette come viene maggiormente richiesto negli ambienti urbani. Tali pali possono venire semplicemente eseguiti mediante una perforazione tubata oppure possono essere rivestiti e scavati ad elica continua, combinando il metodo del CFA, che utilizza una trivella ad elica continua, con il metodo Kelly, che utilizza il rivestimento. Queste tecnologie di perforazione si sono affermate recentemente grazie allo sviluppo di macchine potenti e tecnologicamente evolute di Bauer Maschinen.

### 1 Introduzione

Il metodo dei pali secanti rappresenta una tecnologia di perforazione che si è evoluta grazie alla realizzazione di macchine potenti e particolarmente performanti. Tali pali possono venire semplicemente eseguiti mediante una perforazione tubata (segmentale) oppure possono essere rivestiti e scavati ad elica continua, tramite un sistema in grado di gestire contemporaneamente rivestimenti ed opportuni utensili di scavo. Il risultato è un foro incamiciato secondo quanto specificato da DIN 4014 (o EN 1536) prodotto per mezzo di una elica continua. Questa tecnica, nella sua applicazione più evoluta, è anche conosciuta come “sistema con dispositivo a doppia rotazione” o “sistema con doppie teste di rotazione” (identificato con l'acronimo “DK”, Doppie Kopf, Doppia Testa); al posto della doppia testa di rotazione si può utilizzare anche un moltiplicatore meccanico di coppia, chiamato TM (“Torque Multiplier”). L'acronimo CCFA significa Cased CFA, cioè metodo CFA rivestito.

### 2 I muri di pali secanti

Esistono vari sistemi tecnici per costruire muri di sostegno con pali secanti; la selezione della metodologia migliore viene normalmente basata sull'analisi di vari parametri che, oltre a quelli economici, sono principalmente tecnici e vengono legati principalmente:

- alla rigidità del muro al fine di minimizzare i cedimenti delle strutture adiacenti,
- alla permeabilità accettabile del muro ed
- all'uso delle opere di fondazione quali elementi strutturali della nuova costruzione.

Pertanto, un'accurata analisi delle tecnologie utilizzabili in funzione delle condizioni al contorno forniranno al Progettista gli elementi per effettuare la scelta più consona in funzione dell'opera da realizzare.

## 2.1 Definizione

Possiamo pertanto definire un muro di pali secanti come una struttura di pali che vengono costruiti in una configurazione tale da renderli intersecanti tra di loro. I dati geometrici che identificano questa lavorazione sono visibili in **Fig. 1**. Tale metodologia viene utilizzata per costruire muri di rinforzo contro le spinte del terreno e può venire sfruttata in diverse condizioni geologiche per sostituire sistemi più convenzionali quali i diaframmi o le palancolate.

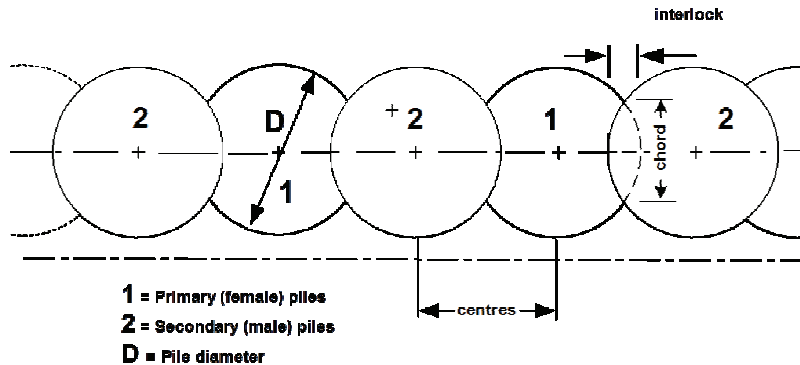


Figura 1. Dati geometrici

## 2.2 Sovrapposizione

Per quanto riguarda il valore della sovrapposizione, per cui la lunghezza della corda progettata per sopportare e trasferire i carichi orizzontali, nonché per garantire la tenuta del giunto, deve essere calcolata in funzione:

- della lunghezza del palo,
- del suo diametro e
- delle attrezzature che verranno utilizzate per eseguire il lavoro.

Un valore medio va da 70 a 250 mm, ricordando che con le moderne attrezzature si possono garantire deviazioni non superiori ad 1:300.

## 2.3 Armature

Per quanto riguarda le armature è chiaro che si possono usare tutte le tipologie classiche, dalle travi in acciaio alle gabbie elettrosaldate. Si raccomanda però, generalmente, di utilizzare armature simmetriche circolari, anche se sarebbe più economico installare armature asimmetriche con una maggior concentrazione di barre in acciaio nella zona di tensione. L'esperienza ha mostrato che tali elementi potrebbero torcersi durante la posa in opera (o nella fase di getto e/o nella fase di estrazione dei rivestimenti) e, pertanto, annullare i benefici strutturali calcolati. Nel caso fosse richiesto di armare anche i pali secondari frequente è l'utilizzo di gabbie a sezione rettangolare.

## 3 Vantaggi e limiti del metodo CCFA

I principali vantaggi del metodo di costruzione CCFA sono:

- Perforazione e rivestimento in un'unica operazione.
- Possibilità di operare in materiali particolarmente scadenti, ove cioè, ad esempio, è difficile supportare le pareti del foro, così come possibilità di affrontare formazioni particolarmente resistenti grazie allo sviluppo di particolari utensili di scavo.
- Lavorando per sequenza primario – secondario, prima della fase di intersezione si è già prodotto un effetto resistente di tenuta meccanica, per cui la metodologia di scavo, utilizzando peraltro i rivestimenti a correre, limita al minimo i rischi di cedimenti alle strutture limitrofe.
- E' possibile lavorare in quasi perfetta adiacenza geometrica alle strutture che confinano con l'opera da eseguire, in metodologia FoW (Front of Wall)..
- I pali secanti possono essere utilizzati come parte integrante strutturale della costruzione.

- Vi è una discreta flessibilità in quanto a diametri e profondità di esecuzione.
- I pali secanti possono essere eseguiti con una certa inclinazione, situazione che può risolvere problematiche di interferenze geometriche con eventuali ostacoli presenti nel sottosuolo.
- L'inquinamento acustico è inferiore che con il metodo convenzionale kelly.
- E' possibile l'applicazione del sistema a doppia testa con rivestimento in terreni uniformi non coesivi con coefficiente di uniformità  $U \leq 3$  ed in terreni coesivi di una coesione in stato non drenato di  $c_u \leq 15 \text{ kN/m}^2$ .
- Il procedimento standard non richiede alcun supplemento di acqua in tutte le condizioni del terreno.
- I procedimenti standard e speciali possono essere utilizzati per la perforazione con rivestimento parziale, se il terreno è idoneo per questo scopo
- Alta produzione ed efficienza economica; i tempi di esecuzione possono essere ridotti fino al 40% in confronto al metodo Kelly.
- Il cantiere è pulito, non venendo utilizzati fanghi di perforazione.
- A tal proposito i costi di smaltimento del materiale di risulta sono ben più contenuti.
- Non si devono installare impianti di preparazione dei fanghi di perforazione per cui non è neanche necessario reperirne le idonee aree.
- I quantitativi di materiale da costruzione sono più limitati (paragonando tale lavorazione, ad esempio, ad un muro eseguito con diaframmi); ciò si riflette anche sulle problematiche dovute all'approvvigionamento in ambiente urbano (sia in quantitativi di CLS che in dimensioni di gabbie d'armatura).
- Generalmente la qualità estetica finale dell'opera è molto buona; i fenomeni di sbulbature sono quasi assenti (**Fig. 2**).

Esistono alcuni limiti in quanto a diametro ed a profondità e vanno analizzati in funzione della attrezzatura di scavo, dei diametri di perforazione e delle profondità da raggiungere. Ulteriori limiti della tecnologia sono dovuti alla difficoltà di perforazione in formazioni geologiche difficili, quali quelle con presenza di trovanti. In situazioni gravose, pertanto, può essere più conveniente utilizzare, al posto della tecnologia CCFA, sistemi classici di esecuzioni dei pali secanti (perforazione a kelly con tubi di rivestimento, quali l'esperienza di Copenaghen).



**Figura 2. Sottopasso della Stazione di Mestre (MANTOVANI)**

#### 4 Pali secanti eseguiti con metodo convenzionale

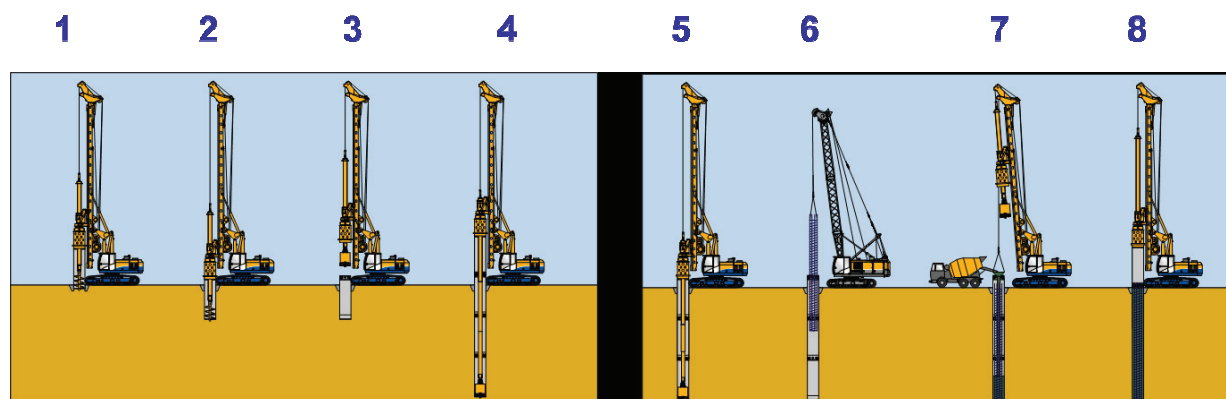
In questo caso i pali primari vengono perforati utilizzando un metodo convenzionale, che può essere:

- a. kelly bar con trivella,
- b. kelly bar con bucket o
- c. CFA

In presenza di materiali teneri, oppure di fronte a trovanti intercalati a strati di materiali sciolti, comunque quasi sempre, si utilizza un rivestimento di protezione dello scavo, che presenta anche il vantaggio di limitare i fenomeni di sovraconsumo in CLS dovuti a possibili sbulbature. La procedura di

pulizia del foro, posa dell'armatura e getto è quella classica dei pali tubati. L'estrazione del rivestimento avverrà o tramite il trascinatore oppure con una opportuna morsa giracolonne. Il ciclo di funzionamento è ben visibile nello schema riportato in **Fig. 3**. Le fasi operative sono:

1. Posizionamento dell'attrezzatura
2. Installazione del primo rivestimento
3. Scavo
4. Installazione dell'ultimo tubo
5. Perforazione sino alla profondità finale
6. Posa in opera della gabbia di armatura
7. Getto
8. Estrazione della colonna di rivestimenti



**Figura 3. Ciclo di lavoro per la perforazione dei pali secanti con rivestimento modulare**

La perforazione dei pali secondari viene frequentemente messa in relazione allo stato di maturazione del getto del palo primario ed è funzione:

- a. del tempo che intercorre tra il getto dei primari e la perforazione del secondario,
- b. della temperatura esterna ed
- c. del mix design del CLS.

Idealmente la resistenza del CLS gettato nei pali primari dovrebbe essere tale da opporre la minima resistenza quando viene "secato" ma sufficiente a mantenere compatta la massa di CLS. Generalmente verranno utilizzate idonee scarpe di taglio montate sull'ultimo elemento di rivestimento, poiché è fondamentale mantenere la verticalità durante la fase di perforazione al fine di garantire la sovrapposizione di progetto con i pali attigui, soprattutto nella parte terminale.

## 5 I primi sistemi di perforazione CCFA in metodologia FoW

Il primo metodo di perforazione a doppia testa rotante è stato sviluppato circa 30 anni fa per soddisfare le esigenze di effettuare scavi profondi vicini a strutture esistenti nel centro di grandi città. Il principale vantaggio è stato quello di minimizzare la distanza tra una costruzione esistente ed il muro di sostegno richiesto (**Fig. 4**). Rammentiamo che il sistema FoW utilizza 2 teste rotanti separate, una per la trivella ed una per il sistema di rivestimento, le quali vengono fatte ruotare in direzioni opposte contemporaneamente. All'inizio tale tecnologia era limitata a piccoli diametri, ma con lo sviluppo di perforatrici più grandi e potenti, il sistema a doppia testa rotante è ora in grado di eseguire pali rivestiti fino a 1.200 mm di diametro.



**Figura 4. Perforazione FoW a doppia testa in ambiente urbano**

Viene utilizzato per colonne, per muri di pali contigui e secanti così come per singoli pali di fondazione. Il procedimento di esecuzione, identico al sistema CCFA, è sequenzialmente il seguente.

1 Il sistema a doppia rotazione comprende un testa di rotazione controrotante connessa all'elica ed una testa connessa al rivestimento.

2 L'utensile viene ruotato e spinto nel terreno; il materiale è scavato dall'elica e grazie ai due moti controrotanti viene trasportato in alto lungo il rivestimento

3 Dopo che è stata raggiunta la profondità finale, la trivella ed il rivestimento sono ritirati ed il calcestruzzo viene pompato attraverso l'asta cava tramite una idonea pompa da CLS.

4 Si sposta la macchina dalla sua posizione e si svuota il rivestimento dal terreno attraverso la rotazione in senso contrario della trivella e del rivestimento.

5 Segue la posa in opera per gravità o vibrazione della gabbia di rinforzo nel calcestruzzo appena gettato.

## 6 I moderni sistemi a doppia rotazione

Il principio di base delle moderne tecnologie a doppia rotazione è legato al fatto che un'elica continua ruota contemporaneamente, ed in combinazione, con un sistema di rivestimento esterno, che ruota a sua volta normalmente in direzione opposta; entrambi gli utensili vengono guidati simultaneamente all'interno del terreno da perforare. Questa caratteristica comunemente definisce il palo ad elica continua rivestito (CCFA).

La distanza tra il rivestimento e la trivella può essere variata, l'una verso l'altro, di ca. +/-300 mm per mezzo di cilindri idraulici (esistono alcune versioni speciali ove tale escursione può essere ben maggiore); secondo le condizioni del terreno, la trivella può avanzare prima del rivestimento o viceversa. Di solito il rivestimento avanza prima dell'utensile o eventualmente alla stessa profondità per stabilizzare il terreno circostante, ma in caso di perforazione attraverso ostacoli o terreni duri, l'elica può avanzare prima del rivestimento stesso.

Il terreno di scavo viene trasportato in alto dall'elica della trivella ed è scaricato all'esterno attraverso idonee aperture poste nella zona superiore del rivestimento. Il palo è gettato tramite il pompaggio di calcestruzzo attraverso l'asta della trivella durante la sua fase di estrazione. La velocità di estrazione viene tenuta sotto controllo tramite i valori di pressione e di portata totale del calcestruzzo pompata all'interno.

Dopo la pulizia della testa del palo, una gabbia di rinforzo è generalmente posizionata centralmente, in asse alla perforazione eseguita, e viene spinta o vibrata nel palo appena gettato.

Generalmente il sistema di perforazione a doppia testa può classificarsi nei seguenti tipi principali:

A. Sistema FoW

B1 CFA rivestito con 2 rotary indipendenti

B2 CFA rivestito con moltiplicatore di coppia BTM

I principali vantaggi dei pali CFA e dei pali trivellati rivestiti vengono pertanto riuniti in questa particolare metodologia di perforazione.

### 6.1 Sistema FoW

Abbiamo già accennato al fatto che uno dei problemi principali per la costruzione di muri di sostegno direttamente a contatto di edifici esistenti è la mancanza di spazio. Gli impianti di perforazione standard occupano molto spazio a causa degli accorgimenti meccanici che vengono installati nella zona della rotary.

Il sistema FoW permette la perforazione di pali in aree confinate e vicino alle strutture esistenti poiché le dimensioni delle 2 rotary sono state minimizzate e non sono presenti elementi meccanici al di fuori della proiezione geometrica del diametro di perforazione (**Fig. 5**).

Una distanza di circa 10 cm tra il muro di sostegno e l'edificio esistente è normalmente sufficiente per eseguire tale lavorazione.



Figura 5. Doppia testa rotary in versione FoW

## 6.2 Sistema CFA rivestito con 2 diverse teste di rotazione

Dalla metà degli anni '90 cominciarono ad essere presenti sul mercato attrezzature di perforazione molto potenti, in grado di gestire idraulicamente due diverse teste rotanti su unica perforatrice (Fig. 6).

Tale sistema ha operato ed opera in modo relativamente economico, con buone produzioni. L'handicap principale è relativo alla costosa installazione della seconda rotary, con la predisposizione di un nuovo circuito idraulico.

Esistono anche problematiche meccaniche soprattutto legate alla sincronizzazione dei due circuiti oleodinamici, in quanto a suddivisione delle portate e pressioni idrauliche in funzione del mutare delle esigenze operative (quali il mutare delle condizioni geomeccaniche del terreno ove si va a scavare).



Figura 6. Doppia testa di perforazione

## 6.3 Sistema CFA rivestito con moltiplicatore di coppia BTM

Una fase di ricerca più spinta fu decisa proprio per colmare i sopraccitati svantaggi; il risultato è stato l'invenzione di un sistema meccanico da applicare ad una rotary standard, in grado di moltiplicare la coppia diminuendo proporzionalmente la velocità di rotazione; fu chiamato "moltiplicatore di coppia" o "BMA Torque Multiplier". In Fig. 7 vediamo l'utilizzo di un BTM 400K assemblato di una recente BG 30 Premium Line. Tale applicazione è stata effettuata per eseguire pali isolati completamente rivestiti per il progetto di CityLife a Milano; sono stati eseguiti ca. 800 pali sino a 20 m di profondità, da 800 e 1.000 mm di diametro. La produttività media è arrivata ad essere 10 pali/giorno.



Figura 7. BTM 400K su BG30 Premium Line per il progetto di CityLife a Milano (FONDAMENTA)

Il principio del moltiplicatore è stato trasferito anche in perforazione in modalità CCFA, in combinazione con una tramoggia di scarico del materiale; in questo caso la coppia viene suddivisa tra elica e rivestimento (non più interamente dedicata ad un solo utensile come per la perforazione kelly) e, tramite un cinematismo, i mutui sensi di rotazione vengono contrapposti (per facilitare l'evacuazione

del materiale scavato). Al fine di garantire una gestione adeguata del materiale di risulta viene installato un particolare dispositivo di scarico del terreno perforato; quest'ultimo fuoriesce attraverso una opportuna apertura di scarico rotante e cade attraverso un ingegnoso sistema di tramogge concentriche a terra. Sia la fase di perforazione che quella di getto vengono frequentemente coadiuvate da un idoneo circuito pneumatico; generalmente una valvola dell'aria compressa, collegata ad un compressore, viene applicata al girevole per il getto. Durante la perforazione l'aria viene pompata, attraverso il mandrino, verso la punta della trivella; la pressione impedisce che nel foro penetrino eventuali infiltrazioni di acqua o intrusioni di materiale e che avvengano fenomeni di decompressione del suolo. Inoltre, il terreno, che è perforato in via asciutta, viene supportato dal flusso di aria compressa durante la sua veicolazione verso l'esterno, nell'intorno delle spire dell'utensile di perforazione. Una caratteristica particolare del sistema con BTM è legata al fatto che la sua conversione dal metodo di perforazione kelly è facile, poiché non vi è alcuna installazione idraulica che deve essere posta in opera per una seconda rotary, essendo un sistema puramente meccanico.

## 7 Sistema di controllo di qualità del metodo CCFA per pali secanti

Il metodo CCFA viene utilizzato principalmente per la costruzione di paratie di pali secanti. Gli standard di qualità per tale metodo devono essere molto elevati in quanto i costi, in caso di danni, sarebbero enormi; è necessario quindi una attento e curato sistema di qualità. Abbiamo già commentato il fatto che il muro di guida deve essere in grado di garantire la corretta posizione e la sovrapposizione di ogni palo, oltre a facilitare il posizionamento della macchina ed in particolare l'allineamento e la verticalità del mast e del rivestimento. La verticalità del rivestimento deve comunque essere generalmente controllata manualmente, con una livella, anche se tale valore viene misurato e registrato dal sistema elettronico automatico. Le correzioni della verticalità possono essere facilmente realizzate spostando nelle direzioni X e Y l'estremità superiore del rivestimento con il trascinatore. La modalità di Assistente Operatore elettronico e dei sistemi di controllo automatico della verticalità garantiscono che il mast e gli strumenti siano mantenuti in posizione verticale in ogni momento.

### 7.1 Assistente di perforazione

Al fine di limitare il rischio di insorgere di errori durante la fase di perforazione e getto è spesso necessario attrezzarsi con un sistema del tipo "Assistente di Perforazione". La velocità ottimale di perforazione dipende principalmente dal passo delle eliche della trivella e dal diametro sia dell'utensile di perforazione che del rivestimento. In questo caso la resistenza del terreno viene rilevata e presa in considerazione attraverso la pressione idraulica del sistema rotante. Naturalmente la velocità di perforazione e dei vari parametri devono essere controllati dal sistema di gestione ed occorre regolare l'Assistente di Perforazione secondo le particolari condizioni del suolo in ciascun lavoro che si affronta. Una velocità adeguata di penetrazione, che viene attivata dall'operatore durante la perforazione, presenta i seguenti vantaggi:

- evita il problema dell'effetto "cavatappi",
- ottimizza il grado di riempimento dell'elica,
- ottimizza il processo di foratura e
- rende più libero l'operatore che diventa un "Controllore" delle funzioni automatiche impostate.

Pertanto, i dettagli esatti degli strumenti utilizzati di perforazione devono essere inseriti nel sistema; ad esempio, in **Fig. 8**, è visibile la schermata del B-Tronic che richiede i dati per l'impostazione del processo automatico di perforazione e successivo getto.

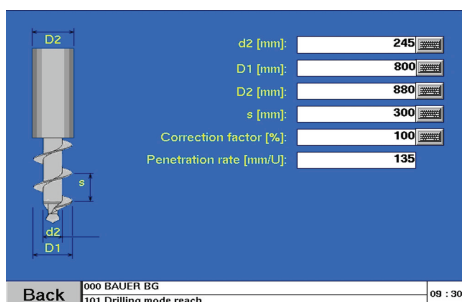


Figura 8. Dati di input del B-Tronic in versione CCFA

A seconda delle condizioni del terreno viene determinato uno speciale parametro che indica il grado di riempimento della trivella. La velocità di spinta è calcolata secondo i seguenti parametri:

- d = diametro del mandrino
- D1 = diametro esterno del rivestimento
- D2 = diametro esterno dell'elica
- $\Psi$  = grado di riempimento dell'elica
- s = passo dell'elica
- t = profondità di penetrazione

## 7.2 Assistente di estrazione

Un assioma: la base per un getto controllato è la conoscenza dettagliata della quantità e della pressione del calcestruzzo da utilizzare. Generalmente esistono due modi diversi per misurare la quantità di calcestruzzo.

Il primo è il metodo diretto, dove la portata viene determinata all'interno del tubo di getto da un flussometro; questo sistema può dipendere dalla costanza di qualità del calcestruzzo e da una perfetta calibrazione del sistema. Dal momento che le caratteristiche del calcestruzzo possono variare notevolmente, tale sistema può essere integrato (meglio) o sostituito da una misurazione più diretta.

Il metodo integrativo, forse più facile da controllare, è quello di misurare ogni mandata della pompa di calcestruzzo; tale rilevamento viene eseguito tramite un misuratore di pressione nel tubo del calcestruzzo sulla perforatrice. Ogni singola corsa può essere nettamente distinta, in modo che ogni colpo venga contato; ovviamente la quantità di calcestruzzo che viene pompata per corsa deve essere misurata ed inserita nel software. Durante un test eseguito con 3.000 m<sup>3</sup> l'errore è stato di circa l'1% del totale, che è un risultato molto soddisfacente.

Un approccio comune è anche quello di contare le pulsazioni direttamente sulla pompa di calcestruzzo; ciò viene eseguito dal sistema elettrico della pompa stessa o con un sensore di distanza applicato sui cilindri idraulici della valvola ad S. Successivamente il dato viene trasferito alla perforatrice tramite un segnale radio.

Dopo avere ricevuto tali input, l'Assistente all'Estrazione dispone di informazioni sufficienti per guidare la macchina per un getto di "qualità" del palo perforato. La velocità viene calcolata con formule semplici che prendono in considerazione il volume; come abbiamo già commentato, un eventuale consumo maggiore di calcestruzzo può essere definito e regolato in relazione alle condizioni del terreno. La schermata di lavoro del software della macchina mostra all'operatore tutte le informazioni importanti del processo di produzione (Fig. 9). Uno strumento aggiuntivo di misurazione della pressione del calcestruzzo può venire installato sulla testa del girevole in modo da raddoppiare il controllo del flusso di calcestruzzo e fornire un segnale di allarme in caso di sovrappressione.

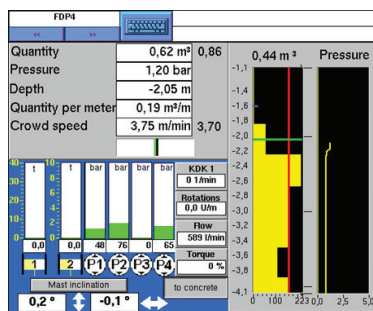


Figura 9. Classica schermata del B-Tronic in modalità Assistente di Getto

## 8 Assicurazione di qualità del palo

E' pertanto chiaro quanto importante sia che gli impianti di perforazione vengano dotati di un sistema di misurazione elettronica dei dati di acquisizione per registrare e documentare la qualità dei pali prodotti. Soprattutto in una lavorazione delicata come il CCFa almeno i dati relativi alla:

- perforazione,
- velocità di rotazione,
- velocità di estrazione durante la posa del calcestruzzo,
- pressione del calcestruzzo così come
- del volume del calcestruzzo

devono venire acquisiti, visualizzati ed archiviati on line sulla macchina da perforazione.



L'uso del sistema B-Tronic consente che sia effettuata una verifica della verticalità anche in 3-D; tali informazioni ne vengono da un sistema integrato che valuta topograficamente vari parametri, tra i quali:

- la posizione della perforatrice e
- la direzione del movimento della perforatrice in linea con l'asse del muro,

restituendo graficamente le eventuali deviazioni o scostamenti dai dati di progetto. Eventuali carenze in termini di qualità possono quindi essere corrette durante la produzione. Qualora, per motivi tecnici siano escluse correzioni durante la produzione, ulteriori misure per assicurare la qualità della lavorazione eseguita possono essere prese dopo il completamento ed ogniqualevolta siano richieste. L'elevato grado raggiunto di garanzia di verticalità e di qualità dell'esecuzione è stato, ad esempio, comprovato in un cantiere ove è stato utilizzato sia il sistema standard CFA che il sistema CCFA. Durante l'esecuzione del muro di pali con il metodo CFA, l'operatore ha rilevato una deviazione della verticalità del palo. Questo fenomeno è avvenuto, chiaramente, soprattutto durante la perforazione di un palo secondario, poiché l'elica ha presentato la tendenza a deviare spostandosi dalle zone ove ha incontrato il CLS già maturo. L'effetto finale di questo fenomeno è visibile in **Fig. 10**. Per questo evidente motivo il metodo di palificazione è stato cambiato in CCFA; il risultato è stato un notevole miglioramento della qualità esecutiva del palo e della tenuta idraulica e meccanica del muro così realizzato. Con il metodo CCFA si sono avute tolleranze di verticalità massime di 1 su 200.



**Figura 10. Pali secanti in CFA contigui a pali in CCFA; si notino le deviazioni dei pali in CFA e la perfetta linearità e tenuta di quelli in CCFA**

## 9 Case histories

### 9.1 CCFA Metro Napoli, ICOTEKNE

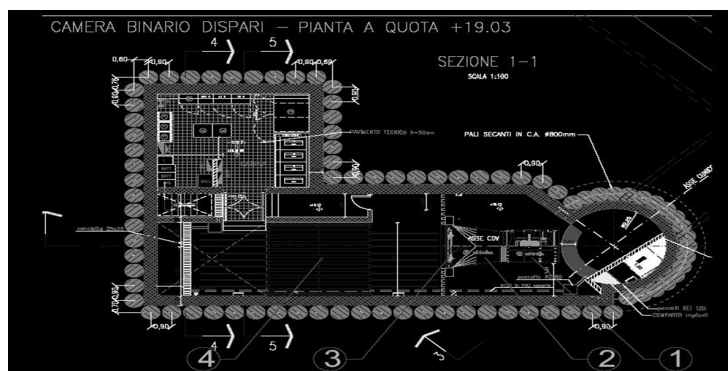
La realizzazione dei pozzi di ventilazione della Linea 1 ha richiesto l'ideazione di una tecnologia in grado di risolvere alcuni problemi peculiari legati principalmente alla difficoltà di perforazione in ambiente urbano (**Fig. 11**), quali.

- la presenza di alti edifici storici, spesso adiacenti per non dire prospicienti allo scavo, con strade di accesso realmente strette, che ha escluso l'utilizzo di idrofrescature ipotizzate in progetto,
- problemi di inquinamento acustico, che hanno escluso qualsiasi ipotesi di utilizzo di benne a gravità ed eventuali scalpelli,
- problemi di carattere operativo legati alla velocità di esecuzione, al fine di limitare i disturbi, che ha escluso l'utilizzo di tecnologie lente, quali i pali semplicemente rivestiti,
- problemi di pulizia del cantiere e delle zone limitrofe, che ha escluso lavori di pali eseguiti con fluidi di sostegno della perforazione,
- problemi di tenuta strutturale della paratia, sia idraulica che statica, che ha escluso tutte le lavorazioni in pali accostati,

- problemi di precisione e di garanzia sulla effettiva realizzazione della sovrapposizione di progetto, che ha escluso paratie di pali secanti eseguite in semplice CFA.

Il materiale perforato, composto per la maggior parte da terra umida di riporto nei primi metri, pozzolane e tufi, spesso sotto falda, non ha necessitato di tecnologie o strutture speciali per il contenimento o il suo trattamento, né dal punto di vista delle polveri né tantomeno da quello delle presenza di acqua.

I tempi medi di lavoro per la costruzione di un palo, avente un diametro da 750 mm e spinto ad una profondità media pari a 15 m, comprensivi di posa in opera del rivestimento e del CLS, sono stati dell'ordine di 30 minuti a palo finito (eseguito con BG28 + BTM400).



**Figura 11. Lavori in spazi ristretti a NA e lay out di un pozzo "tipo" di ventilazione**

## 9.2 CCFA Basaldella, ICOP

Trattasi dei lavori di sistemazione dell'incrocio semaforico tra la Strada Statale 13 (tangenziale ovest di Udine) e la Strada Provinciale 89 in località Basaldella; detta opera prevede la realizzazione di un sottopasso lungo la direzione nord-sud della tangenziale, eseguito in pali secanti (n. 400) ed accostati (n. 370), aventi diametro 880 mm spinti sino a 16 m di profondità.

L'aspetto più delicato dell'esecuzione della palificata è stato certamente quello legato alla natura dei terreni interessati dall'intervento ed al loro attraversamento.

Il terreno si presentava macro-scopicamente omogeneo, prevalentemente costituito da ghiaie in matrice sabbiosa, ed in assenza di falda. Nella realtà l'ammasso ghiaioso comprende alternanze di strati conglomerati e materiale incoerente, con presenza massiccia di trovanti di dimensioni medie compresa tra 20 e 35 cm, in taluni casi comunque fino ad oltre 60 cm (**Fig. 12**).

Da un punto di vista geologico ghiaie e trovanti sono costituiti da calcari e dolomie di origine morenica con resistenze comprese tra 80 e 100 MPa.

Una sonda perforatrice RTG 25S ha consentito l'esecuzione di tutti pali accostati posti a ridosso della recinzione che separa il cantiere dalla viabilità limitrofa (metodo "front of wall"), nonostante il fluire continuo del traffico veicolare. Le medie industriali di produzione sono state dell'ordine dei 110 m al giorno.



**Figura 12. Si noti la pezzatura del materiale scavato e la vicinanza al bordo stradale della perforatrice**

### 9.3 Pali secanti in metodo tradizionale, Variante di Valico A1, TOTO

La realizzazione di pali ha concorso alle opere di fondazione del viadotto Molino di Setta (e non solo). La stratigrafia delle opere di fondazione lungo tracciato è costituita da depositi detritici di versante eterometrici; al di sotto delle coltri sono presenti depositi dell'unità argilloso-calcareo.

Questo progetto ha portato all'introduzione di un nuovo concetto, che è stato quello del "Pozzo equivalente" eseguito con pali di grande diametro 3P (Proactive Portant Pile), aventi diametro 2,5 m.

La disposizione geometrica dei pali delle pile è stata progettata a simmetria radiale (n. 7 pali con interasse costante pari a 3,35 m), con centro di simmetria coincidente con l'asse baricentrale della singola pila.

La scelta nell'adozione di una tale disposizione planimetrica è scaturita dalla volontà di replicare, nei limiti del possibile, la soluzione progettuale utilizzata nell'esecutivo, consistente nella realizzazione di pozzi di fondazione.

L'adozione dei pali in luogo del pozzo ha consentito di diminuire i tempi di realizzazione delle fondazioni di circa il 30 %, senza incidere negativamente sulle prestazioni della fondazione.

In tale configurazione sono anche stati realizzati pali secanti di cinturazione delle fondazioni a pozzo; l'operatività è stata garantita utilizzando rivestimenti sezionali della lunghezza sino a 6 m (**Fig. 13**).



Figura 13. Perforazione di coronelle di pali secanti utilizzando rivestimenti sezionali a doppia parete.

## 9.4 Pali secanti per la Metropolitana di Copenaghen, ICOP

Questo progetto, attualmente in corso di esecuzione, ha mostrato un interessante caso di confronto tra tecnologie differenti di perforazione, quali CCFA e pali tubati in metodo tradizionale.

Le stazioni progettate sono generalmente composte da un rettangolo in pali secanti ( $\varnothing$  1 m, H 23-36 m) aventi larghezza 60 x 20 m, al quale si aggiungono altre camere di servizio in posizione variabile con pali meno profondi. Mediamente ogni stazione richiede circa da 7.000 a 10.000 ml di pali.

La geologia di scavo è così sintetizzabile:

- Sabbia limosa da 12 a 28 m,
- falda da -4 a -11,
- dai -12 (-28) calcare fratturato,
- inclusioni di layers in selce 2-10 cm solo nel calcare, 300 MPa di resistenza (nera come il basalto ma fragile perché appoggia sul calcare fratturato)
- presenza di trovanti metrici di granito da -3 a -8 m che devono venire carotati
- i pali devono essere ammorsati nel calcare per 8 -10 m

La tecnologia con la quale sono stati affrontati tali lavori sin dall'inizio è stata quella del CCFA; a causa delle profondità da raggiungere e della difficile geologia di scavo per la presenza di formazioni particolarmente resistenti, che aveva portato in grave ritardo le opere di fondazione, è stato deciso di intervenire in supporto all'opera con macchine più prestazionali fornite da Bauer (BG30, 39 e 40), in grado di tubare e scavare in modalità kelly (**Fig. 14**).

Gli utensili utilizzati sono stati del tipo standard, quali bucket, eliche da roccia, carotieri e tubi di rivestimento con scarpa di taglio ad utensili intercambiabili.

In questo progetto sia i primari che i secondari sono armati con gabbia circolari e rettangolari.

La produttività per le stazioni con pali da 23 m è pari a n. 2 pali/gg, per i 36 m n. 1 palo/gg. Le tolleranze riscontrate in perforazione sono state del 0,5% (anche inferiore) in verticalità.



**Figura 14. Metro Copenaghen - si notino: 1. il materiale lapideo ad elevata resistenza opportunamente carotato, 2. Le macchine in batteria al lavoro e 3. La fase di perforazione di alleggerimento**

## 10 Bibliografia

Bringiotti M., *Recenti Cantieri innovativi in Italia*, 2006, Quarry & Construction, GeoFluid, Edizioni PEI, Parma

Bringiotti M., *Nuove metodologie di esecuzione dei pali trivellati*, 2010, Convegno: Nuove regole per una vera qualificazione, AIF, XVIII Mostra Internazionale GeoFluid, Piacenza

Bringiotti M., *Geotecnica e Macchine da Perforazione – Metodologie ed Innovazioni*, 2010 Edizioni PEI, Parma,

Bringiotti M., Parodi GP, *Pali 3P – Proactive Portant Pile – pali proattivi di diametro particolarmente elevato (> 2 m); accorgimenti per le macchine ed un cantiere unico sulla A1 in Variante di Valico*, 2011, XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica, Napoli

Dalle Coste A., Grillo L., Bringiotti M., *Un cantiere ad alta tecnologia*, Febbraio 2010, Quarry & Construction, Edizioni PEI, Parma