INNOVAZIONI TECNOLOGICHE BAUER NEL CAMPO DELLE FONDAZIONI

Dal cutter Soil Mix AL TRIPLE AUGER

DR. ING. RENATO FIOROTTO[1]
DR. GIORGIO & ING. MASSIMILIANO BRINGIOTTI[2]
DR. WOLFGANG MANHART[3]
DR. DAVIDE NICASTRO[4]

Il presente breve trattato è stato sudddiviso in 10 capitoli monotematici: 1. DMM, 2. CSM, 3. SDP, 4. Ground improvement, 5. RTG, 6. Fly Drill, 7. Benne idrauliche con sistema di rotazione, 8. Impianti di dissabbiamento, 9. Controllo di verticalità nelle idrofrese, 10. Le innovazioni in campo idrofresa a Milano. In questa 1° parte verranno esposti i due capitoli iniziali; nel prossimo numero di Q&C riporteremo i successivi

1° PARTE

L'articolo in oggetto si pone l'obiettivo di illustrare quanto di innovativo nel campo delle fondazioni è stato ideato, progettato e costruito dalla Bauer Maschinen ed applicato con successo in svariate occasioni dai suoi Clienti in Italia e nel Mondo. Tratteremo, in questa sede, soprattutto le tecnologie di "soil improvement", sistemi che hanno come fine ultimo il miglioramento delle condizioni geomeccaniche dei terreni ove vengono utilizzati, con i relativi vantaggi di velocità e qualità, del limitato costo e della salvaguardia dell'ambiente. Punta di diamante di tale classe di tecnologie è rappresentata dal Cutter Soil Mixing, invenzione veramente recente premiata peraltro da diverse Associazioni Internazionali.

Fig. 2 - Prof. Dipl. Kfm. Thomas Bauer

Illustreremo anche le esperienze italiane, una tra le quali ha avuto il merito di rivoluzionare le tecniche di scavo di diaframmi portanti nei terreni dell'"interland" e del "down town" di Milano.
Abbiamo diviso questo breve trattato in 10 capitoli ed ad ognuno di essi è stata abbinata la descrizione sintetica di una tecnologia speciale, forse per molti sconosciuta... lasciatecelo dire: "era ora che qualche cosa di nuovo si vedesse in questo settore!".

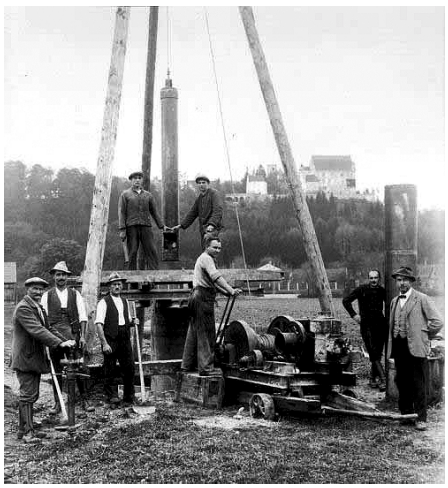


Fig. 1 - Macchina da pozzi Bauer negli anni '30

Il gruppo Bauer

Il quartier generale del gruppo Bauer si trova a Schrobenhausen, 60 km da Monaco di Baviera.
La società è stata fondato nel 1790 (Fig. 1) da Sebastian Bauer; più di 200 anni dopo Thomas (Fig. 2) ed un altro Sebastian Bauer ne sono alla guida! Il gruppo attualmente è costituito da quattro società interagenti tra di loro; le due principali sono la Bauer Spezialtiefbau, che si occupa di eseguire i lavori (anche tramite numerose società controllate, quali Bauer und Mourik Umwelttechnik GmbH & Co, FWS Filter und Wassertechnik GmbH, Schachtbau Nordhausen GmbH, Spesa Spezialbau und Sanie-

[1] BAUER MASCHINEN G.M.B.H. www.bauer.de
[2] GEOTUNNEL S.R.L. www.geotunnel.it
[3] BAUER MASCHINEN G.M.B.H.
[4] GEOTUNNEL S.R.L.

rung GmbH e Wöhr + Bauer GmbH) e la Bauer Maschinen GmbH, il cui compito è quello di sviluppare e costruire impianti e macchine per il settore delle fondazioni in tutti i suoi più svariati aspetti tecnologici.
E' chiaro che la possibilità di studiare attrezzature speciali e di poterle utilizzare anche in prima persona ha generato quella sinergia che ha reso il nome Bauer famoso nel mondo.
È delle tecnologie ingegnerizzate e costruite dalla Bauer Maschinen che parleremo in questa sede, per cui è anche importante dire che fanno parte di questa divisione anche una serie di altre società che sono state acquisite nel corso del tempo, alcune delle quali dai nomi prestigiosi e ben conosciute in Italia, quali:

- Klemm Bohrtechnik: macchine idrauliche di "piccolo/medio taglio" per la piccola perforazione
- Eurodrill: martelli, perforatrici e rotary.
- MAT Mischanlagentechnik: sistemi di miscelazione, dissabbiamento, filtrazione e purificazione dei fluidi.
- RTG Rammtechnik: macchine per l'infissione delle palancole e tecnologie speciali.
- Prakla: perforatrici per pozzi (esplorazioni, acqua, gas, petrolio).

Negli ultimi anni il fatturato si è attestato ad una cifra superiore ai 620 milioni di Euro. 4.100 persone rappresenta la forza lavoro direttamente impiegata.
A buon ragione la Bauer può essere definita la Società leader a livello mondiale specializzata nel settore delle fondazioni.

1. DMM: i metodi Bauer di miscelazione profonda

Nel 1962 Norman Liver brevettò una tecnica di miscelazione del suolo, basata su di una trivella ad elica, metodologia che viene definita "soil mixing", che divenne la base per la tecnologia corrente in tutto il mondo.
Il metodo di miscelazione profonda (DMM: Deep Mixing Method), come è conosciuto oggi, è una tecnica di trattamento del suolo finalizzata a migliorarne le caratteristiche, miscelando lo stesso insieme ad un legante e/o ad altri materiali che vengono aggiunti come fanghi od asciutti.
Tipicamente uno o più alberi cavi rotanti, connessi ad uno speciale utensile di taglio, vengono assemblati verticalmente sul braccio principale del carro cingolato ed introdotti nel terreno per mezzo di teste rotanti guidate idraulicamente od elettricamente.
L'albero sopra l'utensile può essere ulteriormente equipaggiato con elementi di eliche discontinui o con pale mescolatrici. Il legante viene iniettato attraverso l'albero cavo per mezzo di ugelli di scarico localizzati vicino all'utensile, dove viene mescolato con il terreno formando quindi colonne di materiale trattato. Il diametro di ogni colonna può essere compreso tra 0,6 e 1,5 m e può estendersi sino a 40 m di profondità.
Tali strutture possono essere costruite singole, contigue, secanti od in qualunque altra tipologia si ritenga opportuna, sia su terra ferma che in mare.
La geometria (Fig. 3) che viene scelta è dettata dallo scopo che il metodo DMM deve raggiungere. I principali gruppi di applicazioni sono:

- Muri di ritenuta idraulica.
- Muri di sostegno per scavi.
- Trattamento di grossi quantitativi di terreno.
- Riduzione del fenomeno della liquefazione del terreno, rafforzamento in situ, pali, muri a gravità.
- Soluzioni ecologicamente compatibili.

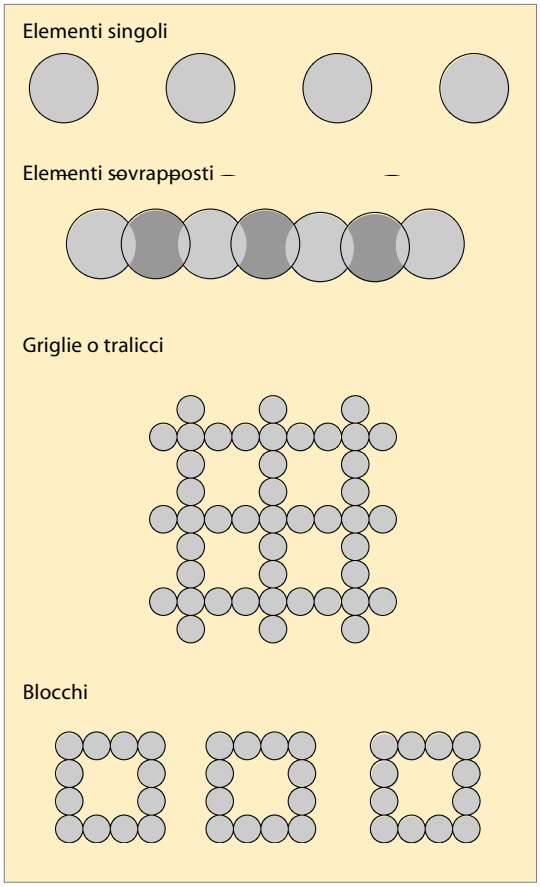
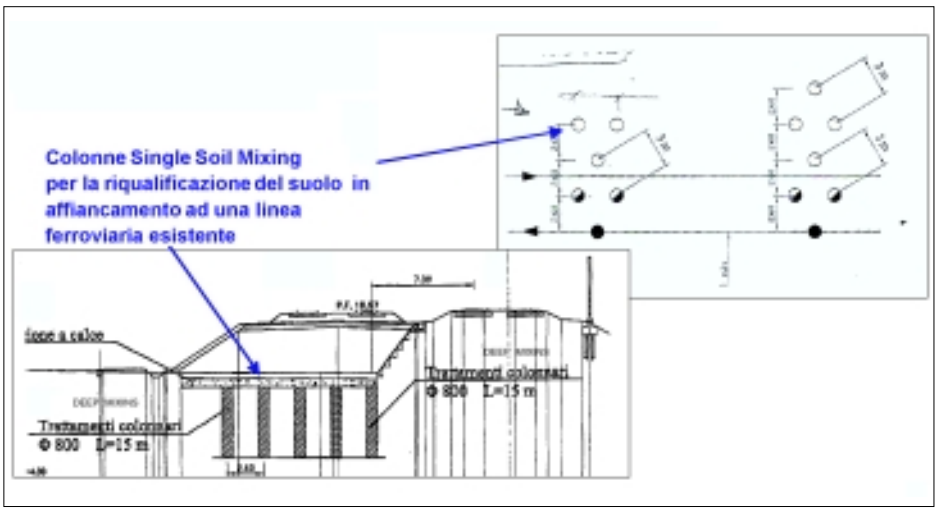


Fig. 3 - DMM: tipologie geometriche di interventi

Fig. 4 - Lay out progettuale del Cantiere di Padova



1.1 SSM: il Single Soil Mixing

Una interessante esperienza "nostrana" è stata fatta recentemente a Padova con l'Impresa Rodio prima e Trevi dopo, impegnate in un lungo lavoro di consolidamento dei terreni di appoggio di una nuova linea ferroviaria, in affiancamento a quella esistente, facente parte del progetto Alta Velocità Padova-Venezia.
Concettualmente parlando, in sintesi il lavoro ha previsto l'esecuzione di una serie di pali lungo l'intero tracciato:

- secondo una maglia a quinconce ad elementi singoli,
- con spaziatura 2,6/3,0 m,
- diametro 800 mm e
- profondità pari a 10 e 15 metri (Fig. 4).

Il materiale da trattare è rappresentato da argille e limi, aventi le classiche caratteristiche di quelle zone.
In questo caso sono state utilizzate n° 2 perforatori idraulici Bauer, classe BG 18H, provviste di una prolunga del kelly di 8 m, attrezzate di un rotary avente una coppia di 180 kN a 55 rpm.
Dovendo essere la fase di iniezione perfettamente monitorata, all'interno della macchina è stato previsto un sistema di controllo e comando computerizzato, interattivo con l'operatore mediante una consolle a touch-screen, chiamato B-tronic (parleremo di tale argomento più diffusamente nel Cap. 9).
Tramite tale avanzato sistema è stato possibile restituire al Cliente (Italferr) un dettagliato "report" di ogni palo miscelato eseguito, con i dati relativi ai quantitativi di miscela utilizzata, le pressioni di iniezione, le velocità e la coppia di perforazione e di risalita, le inclinazioni, ecc..
In linea alla macchina di perforazione, corredata di misuratori di pressione e di flusso della sospensione cementizia iniettata, è stato previsto un opportuno impianto MAT di iniezione composto principalmente da:

- Silos cemento.
- Coclea di scarico.
- Mixer automatizzato.
- Agitatori.
- Pompa di iniezione.

E' interessante notare che l'intero sistema viene radiocomandato direttamente dall'operatore che lavora all'interno della cabina della BG 18H.
A causa delle oggettive difficoltà di miscelazione delle argille, in quanto il grosso problema era rappresentato dalla formazione di un cilindro di materiale attorno all'elica che di fatto impediva una corretta procedura di miscelazione cemento-suolo, l'utensile standard ad elica è stato modificato opportunamente mediante:

- l'inserimento in testa di una coclea di perforazione corta,
- l'asportazione di alcune spire al fine di ridurne la superficie attiva e
- l'aggiunta di piastre inclinate di taglio e miscelazione aventi un profilo molto affilato (Fig. 5).

Tale modifica ha fornito risultati apprezzabili; le colonne da 10 metri di profondità hanno avuto un tempo medio reale di perforazione e miscelazione di 20-25 minuti, approssimabile a 30 minuti per tenere conto dei tempi di riposizionamento.
I risultati tecnici di resistenza sono stati quelli attesi...

1.2 SMW: il Soil Mixing Wall System

Evoluzione del sistema a singola elica di miscelazione è il SMW (Fig. 6) chiamato anche TA (Triple Auger = tripla elica).
Si tratta di una attrezzatura speciale, composta da un sottocarro ed un braccio in grado di sostenere un gruppo meccanico monolitico composto da 3 perforatrici idrauliche rotary che lavorano contemporaneamente. Opportune aste di perforazione trasmettono il moto rotatorio agli utensili di scavo e miscelazione; tipicamente la profondità raggiungibile è di 12 m, con una geometria in pianta pari a 1.000 x 380 mm. Una sequenza di lavoro standard, numerata per fasi, viene descritta nel proseguo:

1. Scavo di una trincea di guida che presenta anche lo scopo di raccogliere il surplus di fanghi; la larghezza è corrispondente al diametro degli utensili di perforazione, la profondità di 30-50 cm.

Fig. 5 - Utensile di miscelazione

2. Allineamento degli utensili di perforazione con l'asse di scavo.
3. Perforazione continua con tutti gli utensili e contemporanea iniezione di sospensione cementizia. Gli utensili laterali hanno un senso di rotazione opposto rispetto a quello centrale. I volumi di sospensione iniettata dalla pompa e la velocità di perforazione vengono correlati e controllati automaticamente, in funzione dei dati impostati ed al fine di non generare perdite di fanghi non volute.
4. Dopo avere raggiunto la profondità di progetto, gli utensili vengono retratti mantenendo il moto rotatorio di

Fig. 6 - Il triple auger in azione

miscelazione. In questa fase il volume che viene iniettato è uguale al volume occupato dagli utensili.

5. Durante la costruzione di un muro continuo, solitamente si procede con una tecnica di sovrapposizione alternata dei pannelli, per cui primario e secondario.

6. Se sono necessari elementi di rinforzo è possibile installare per gravità o vibrazione opportune travi o pali in acciaio. Spaziatura e tipologia saranno funzione dei dati di progetto.

L'impianto di iniezione sarà composto in analogia a quanto descritto precedentemente, pertanto le attrezzature che sono necessarie per un cantiere tipo si possono riassumere in:

- Impianto di miscelazione, completo di 2 agitatori (1 m^3), 2 coclee ed una pompa comandata via inverter.
- Vasca magazzino H_2O (20 m^3) e pompa di adduzione.
- Silos cemento (eventualmente bentonite o materiali premiscelati di iniezione).
- Generatore elettrico, quadro idoneo e cavi di collegamento.
- Tubazioni di iniezione.
- Terna o escavatore per lo scavo della trincea e per mantenere pulite le zone di lavoro.
- Vibratore (eventuale) per l'inserimento degli elementi in acciaio.

Il personale può essere composto da solo 2 persone; l'operatore della macchina ed un responsabile dell'impianto di iniezione (quest'ultimo, non dimentichiamolo, può venire radiocomandato dal posto di guida della macchina, anch'essa corredata di sistema B-Tronic per il controllo e la registrazione di tutti i parametri di perforazione ed iniezione).

I materiali favorevoli (Fig. 7) per l'applicazione di tale tecnologia sono:

- Terreni uniformi.
- Sabbie ghiaiose da sciolte a medio coese e sabbie limose.
- Limi ed argille

Le produzioni ottenibili in condizioni favorevoli possono facilmente superare i 20 m^2 all'ora; il dato comprende la produzione netta di diaframma completato, incluse le sovrapposizioni ed il miscelamento.

Tale tecnologia può venire utilizzata principalmente per due scopi operativi:

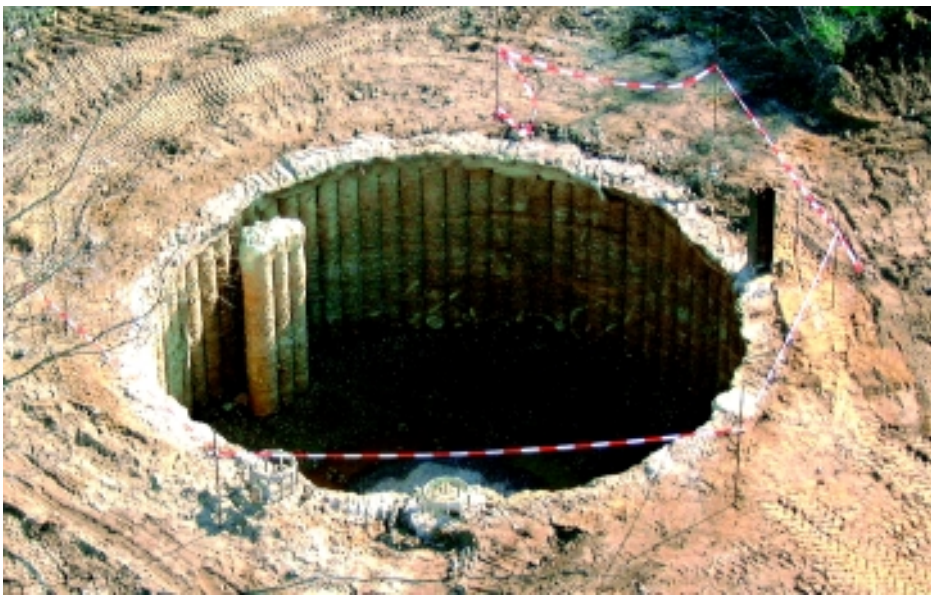
1. Diaframmi di impermeabilizzazione, potendo ottenere valori di limitata permeabilità (< 1 x 10^{-8} m/s) eventualmente correlati ad una bassa resistenza meccanica (< 1 MPa).
2. Strutture di tenuta, quali muri di sostegno, aventi una resistenza meccanica dell'ordine dei 5-10 MPa.

Lo studio delle miscele, di conseguenza, andrà effettuato conoscendo bene le condizioni geomeccaniche del terreno; un test in situ è normalmente consigliabile. Tipici range di proporzionamento della miscela vengono tabellati in Fig. 8.

	Schermi di impermeabilizzazione	Muri di Ritegno
Cemento	250-350 kg/m^3	700-900 kg/m^3
Bentonite	30-50 kg/m^3	30-50 kg/m^3
Acqua	800-900 l/m^3	600-800 l/m^3
A/C	2-3,5	0,7-1,0

Fig. 8 - Proporzionamento della miscela

Fig. 7 - Vista di un lavoro eseguito in sabbie ed argille compatte



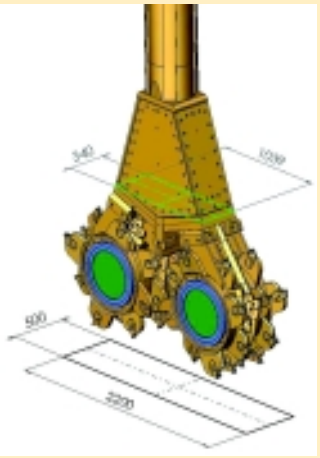
2. CSM: l'innovazione con la "rivoluzione"

In molti casi l'utilizzo del metodo della miscelazione profonda in situ, finalizzata alla costruzione di paratie di ritenuta o muri di sostegno, è spesso condizionato dalle condizioni geologiche ed operative, dalle necessità di progetto e dai fattori economici.

Queste situazioni includono la necessità di un muro di ritenuta competente atto a prevenire la diffusione di liquidi, la migrazione di contaminanti o l'abbassamento della falda ed il suo ripercuotersi sulla stabilita di terreni e costruzioni.

La stabilizzazione di sabbie sciolte o poco coese o di altre formazioni simili, al fine di migliorarne il supporto o come strumento per l'antiliquefazione in zone di attività sismica, rappresenta un'attività, dal punto di vista progettuale ed operativo, che deve essere molto spesso presa in considerazione.

Dal punto di vista economico, il "soil mixing" profondo può essere utilizzato per la costruzione di paratie dove altri sistemi, come travi infisse e muri di rivestimento, non garantirebbero le stesse performance, ove l'installazioni di pali vibrati o trivellati potrebbero in-



Cutter Unit

Lunghezza del pannello	=	2200	mm
Larghezza del pannello	=	500 - 800	mm
Coppia	=	30	kNm
V_{max} delle ruote di scavo	=	40	rpm
Potenza max di scavo	=	100	kW
Peso dell'unità base dell'utensile	=	5500	kg
Volumi:			
- Unità di taglio	=	1,1	m^3
- Kelly bar	=	0,12	m^3/m
Asta di 20 m	=	3,5	m^3

Fig. 9 - Specifiche delle teste fresanti

durre vibrazioni pericolose alle strutture adiacenti e dove le paratie di calcestruzzo sarebbero troppo costose ed onerose anche dal punto di vista del tempo. In funzione delle condizioni locali, il Cutter Soil Mixing (CSM) può adesso rappresentare una valida alternativa all'uso di eliche (singole o triple) di miscelazione, al jet grouting oppure all'applicazione di tecniche miste.

2.1 Cutter Soil Mixing

Nel 2003 la Bauer ha sviluppato la tecnica CSM utilizzando la sua esperienza nella costruzione e nell'uso delle idrofrese (sistemi di scavo per paratie).
La tecnica CSM differisce dalla tradizionale DMM in quanto fa uso di due set di ruote fresanti (Fig. 9) che girano su di un asse orizzontale per produrre pannelli rettangolari, piuttosto che uno o più alberi verticali rotanti che producono colonne circolari.
Due sistemi di trasmissione sono connessi ad uno speciale supporto il quale a sua volta viene collegato è connesso ad un sistema di prolunga "kelly".
Il kelly è montato sul mast principale della macchina di scavo per mezzo di due slitte che guidano ed estraggono l'utensile e, se necessario, lo ruotano.
Durante la procedura di discesa delle teste fresanti, il terreno viene frantumato e disgregato; in questa fase un agente fluidificante, o il legante stesso, è iniettato nell'area compresa tra le teste stesse.
Nella fase di estrazione le teste fresanti ruotano in maniera tale da mescolare il legante con il terreno e formare un pannello rettangolare.
I parametri delle macchine che sono state progettate e costruite sono:

- Lunghezza del pannello: 2.200 e 2400 mm
- Larghezza del pannello: da 500 mm a 1000 mm
- Massima profondità raggiunta con una singola Kelly bar: 30 m
- Massima profondità raggiunta con una Kelly bar telescopico: 40 m

Per le macchine future la lunghezza dei pannelli potrebbe essere estesa a 3.200 mm e la larghezza a 1.500 mm.

2.2 I pannelli rettangolari

I pannelli rettangolari, quando comparati con una serie di pali contigui o intersecanti, offrono un buon numero di vantaggi: strutturalmente, se compariamo le proprietà di un pannello di forma rettangolare con quello formato da una serie di colonne contigue o intersecanti di diametro utile equivalente allo spessore del muro, constatiamo che la forma rettangolare è molto più efficiente; le aree di suolo trattato in compressione e tensione sono più grandi ed il braccio di leva dei pannelli rettangolari è maggiore: questo implica un più elevato momento resistente. Quando consideriamo un muro di colonne secanti, i diametri delle stesse devono essere più grandi che lo spessore del pannello rettangolare, al fine di produrre una sezione di larghezza equivalente. Questo significa che quando usiamo la tecnica CSM tratteremo una quantità minore di terreno per ottenere lo stesso effetto; chiaramente questo significa risparmiare energia e materiale (Fig. 10).
Quando viene richiesta una resistenza addizionale al momento flettente, il muro in CSM può essere rinforzato efficacemente attraverso l'inserimento di travi ad H o di gabbie; la forma rettangolare del pannello permette di ottimizzare la progettazione della struttura in acciaio da inserire nel pannello stesso (Fig. 11).

Fig. 10 - Muro strutturale

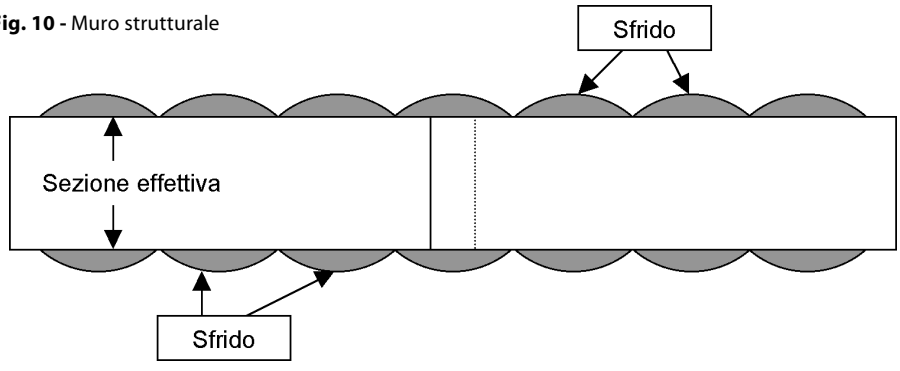
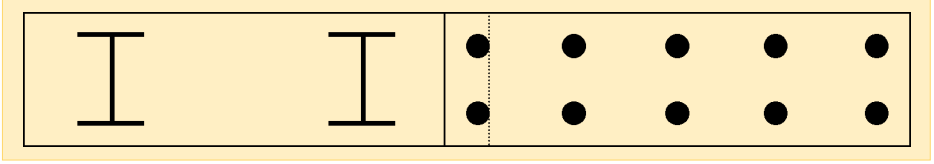


Fig. 11 - Armatura di muri CSM



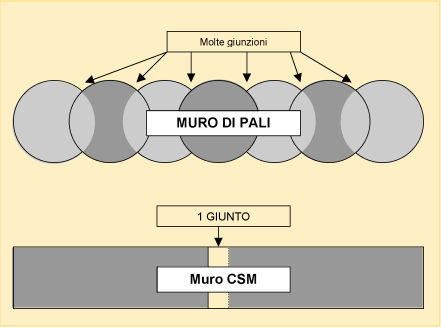


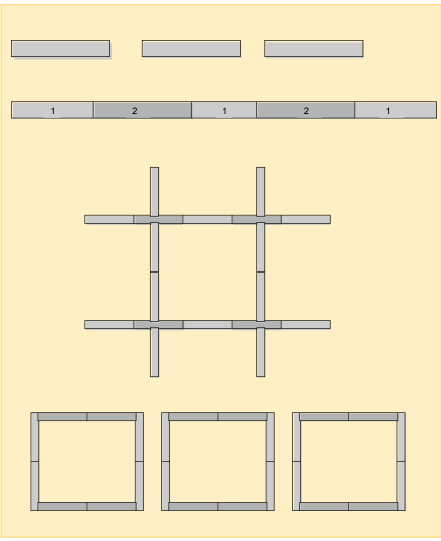
Fig. 12 - Schermi di tenuta

Se progettiamo dei pannelli da utilizzarsi come schermi di ritenuta, il singolo pannello in CSM è continuo per 2.200 mm (2.400 mm) della sua lunghezza, mentre un muro equivalente di pali secanti presenta per lo meno tre giunzioni (Fig. 12).

Ovviamente il rischio di perdite attraverso un pannello costruito con la tecnica CSM risulta essere estremamente minore. Ci sono un numero di vantaggi che il metodo CSM e le macchine impiegate per attuarlo offrono quando comparate con le tradizionali eliche o pale rotanti:

- Le uniche parti in movimento con il metodo CSM sono le ruote fresanti, il che significa che all'interno della trasmissione possiamo installare strumentazioni che ci forniscono informazioni in tempo reale in merito alla situazione a quota di scavo; queste informazioni sono verticalità, deviazioni, eccessiva pressione interstiziale nel suolo, ecc..
- Variando la velocità relativa delle ruote si possono facilmente correggere eventuali deviazioni dei panelli.
- Inoltre, siccome il kelly bar non ruota, non c'è consumo di energia come nel tradizionale metodo DMM, che presenta anche l'inconveniente di generare una notevole frizione tra l'albero dell'elica ed il terreno trattato.

Fig. 13 - Tipologia di pannelli



Come nell'utilizzo delle colonne circolari, i pannelli rettangolari possono essere singoli, contigui, secanti oppure presentare una struttura articolata (Fig. 13).

2.3 Il primo test (Aresing - Germania)

Tra il Dicembre 2003 ed il Gennaio 2004, in cooperazione con la Soletanche-Bachy, è stata testata la nuova tecnologia e le macchine necessarie per attuarla. Nel campo prove Bauer sono stati eseguiti 14 pannelli con tecnica CSM lunghi 2.200 mm e larghi 500 mm ad una profondità di 20 m, scavati circolarmente formanti un pozzo del diametro di 8 m (Fig. 14).

I pannelli perimetrali primari (Fig. 15) sono stati eseguiti con differenti concentrazioni di fluidificanti e malta di iniezione, con tempi di presa dai 2 ai 23 giorni; i pannelli secondari di chiusura, intersecanti con i primari, sono stati costruiti seguendo una sequenza "hard - hard", cioè lavorando con i pannelli primari già ad un certo grado di maturazione.

Fig. 15 - Vista dei pannelli perimetrali del pozzo e di quelli centrali

Al centro del pozzo sono stati costruiti ulteriori tre pannelli, due primari ed un secondario, in sequenza "fresh in fresh" (cioè il pannello centrale secondario ha intersecato i due laterali primari, il cui materiale miscelato non aveva ancora incominciato il processo di presa) per verificare la formazione e la qualità del giunto (Fig. 16). All'interno dell'area del pozzo sono stati costruiti altri due pannelli, uno rinforzato con due travi ad H, l'altro "riesumato" per una ispezione visiva dell'effetto del trattamento (Fig. 17) ed al fine di prelevare campioni del mix suolo - cemento.

Fig. 14 - Pozzo di prova ad Aresing

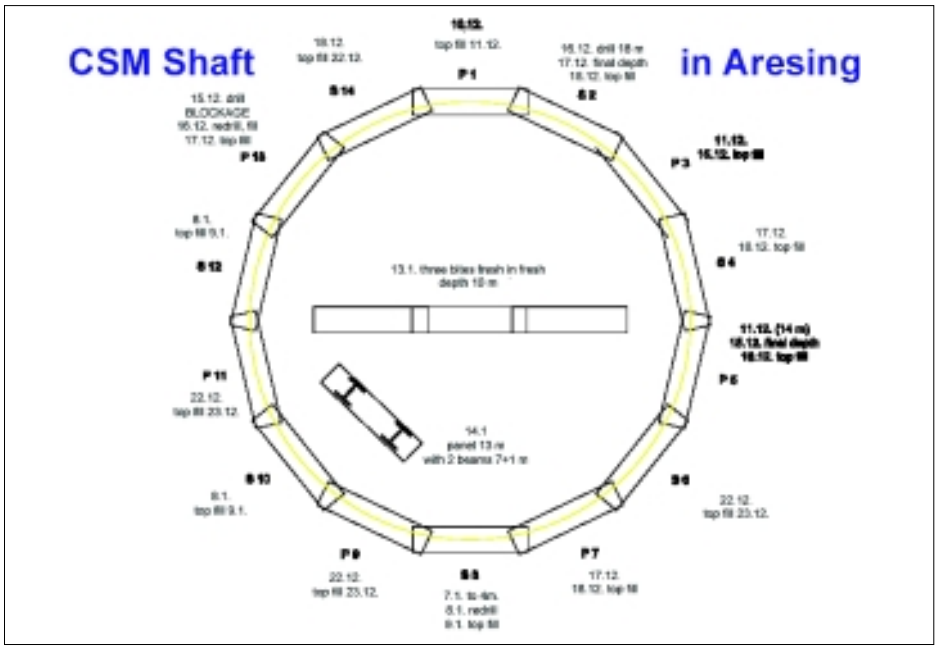


Fig. 16 - Pannello "fresh-on-fresh"

Fig. 17 - Pannello riesumato

La maggior parte delle ricerche su questo primo test sono state dedicate a trovare l'agente fluidificante che avrebbe dato il miglior tasso di penetrazione durante la fase di scavo e di miscelazione: si è cominciato con un mix di acqua e sabbia fine per poi eseguire prove con numerose altre ricette, tra le quali bentonite, polimeri, legante di cemento ed infine un mix di bentonite e fluidificante (Bentocryl), materiale che in questo caso ha fornito il miglior risultato.
Nella tabella riportata in Fig. 18 sono evidenziati i parametri principali che sono stati monitorizzati.
Il fango bentonitico è stato preparato usando un rapporto acqua/bentonite uguale a 12 e per la malta un rapporto acqua/cemento di 0,5.
Le performance medie nello scavo dei pannelli perimetrali sono state le seguenti:

- Media di scavo (fase discendente): 18,05 m^2/h
- Media di miscelazione (fase ascendente): 62,73 m^2/h
- Produttività media: 13,8 m^2/h

Per due pannelli scavati usando un mix di bentonite e fluidificante, la performance media di scavo è stata di 31 m^2/h e la performance media di miscelazione è stata di 67 m^2/h.
Questo indica che ottimizzando il sistema si possono raggiungere produzioni medie di gran lunga superiori ai 30 m^2/h!
Il consumo medio di polvere di bentonite è risultato essere di 44,5 kg/m^3 di suolo trattato ed un consumo medio in cemento pari a 444 kg/m^3 di suolo trattato. Il suolo nel campo test Bauer è formato generalmente da una ghiaia sabbiosa con la presenza di un ban
co dello spessore tra 2 e 3 metri di sabbia argillosa a circa 12 m di profondità. La resistenza finale del mix suolo - cemento, misurato con un test di resistenza a compressione semplice, su campioni prelevati da diversi pannelli al loro interno, ha variato tra i 5 e gli 8 MPa.

Fig. 18 - Dati rilevati ad Aresing

Pannello	Superficie [m^2]	Tempo di scavo [min]	Tempo di miscelazione [min]	Consumo di bentonite [m^3]	Consumo di sospensione cementizia [m^3]
P1	44	126	48	10	6,6
P7	41.8	140	57	10	7.2
P9	44	135	42	14,2	7.5
P11	44	133	35	11,8	7.7
S2	44	176	55	14,5	8.2
S4	44	109	46	10	7,0
S6	41.8	153	31	10	6,0
S8	41.8	170	30	9,4	5,3
S10	41.8	130	44	9,5	6,8
S12	41.8	163	36	10.6	6,8
S14	44	185	47	12,2	6,1

2.4 Test in Giappone (Tokyo)

Nel Maggio 2004 è stato eseguito, assieme all'impresa D.K. Com, un ulteriore test (dopo Aresing e le prime esperienze in Olanda, del quale in Fig. 19 viene riportata una foto operativa, ed in Belgio) nella baia di Tokio in Giappone, dove il terreno è in genere caratterizzato da 6-9 m di argille tenere coperte da sabbie limose.
Il test, in accordo con le normali pratiche giapponesi per la costruzione dei muri di ritenuta con la tecnica del soil mixing, aveva lo scopo di migliorare le caratteristiche del terreno e l'obiettivo di fluidificare lo stesso affinché non ci presentassero problemi per la fase successiva di installazione, all'interno dei diaframmi, di travi in acciaio.
Altre richieste furono:

- buona omogeneità del mix,
- trattamento continuo e regolare lungo tutto il pannello e
- buona qualità delle giunzioni (Fig. 20).

La resistenza era di secondaria importanza (5 kg/cm^2 erano sufficienti).
Ulteriori peculiarità che furono adottate per il test, affinché i risultati potessero essere comparabili con il tradizionale SMW utilizzato in Giappone, furono:

- l'uso di aria compressa, iniettata insieme al legante, sia durante la fase di fresaggio che di risalita,
- un alto rapporto acqua/cemento e
- l'iniezione del legante sia durante la fase di discesa che di risalita.

I principali parametri di lavoro utilizzati sono stati:

- Profondità dei pannelli: 20 m.
- Intersezione dei pannelli primari con i secondari: 100 mm.
- Cemento: 200-250 kg/m^3 di suolo trattato.
- Circa il 70 % del volume teorico del legante nella fase di discesa ed il 30 % in quella di risalita.
- Alta velocità di esecuzione (50-70 cm/min in discesa e 70-120 cm/min in risalita con un alto tasso di pompaggio pari a 200-300 l/min).

2.4.1 Osservazioni

I livelli di coppia durante la fase di fresatura e poi di miscelazione sono stati piuttosto bassi e la velocità di penetra-

Fig. 19 - Lavoro in Olanda

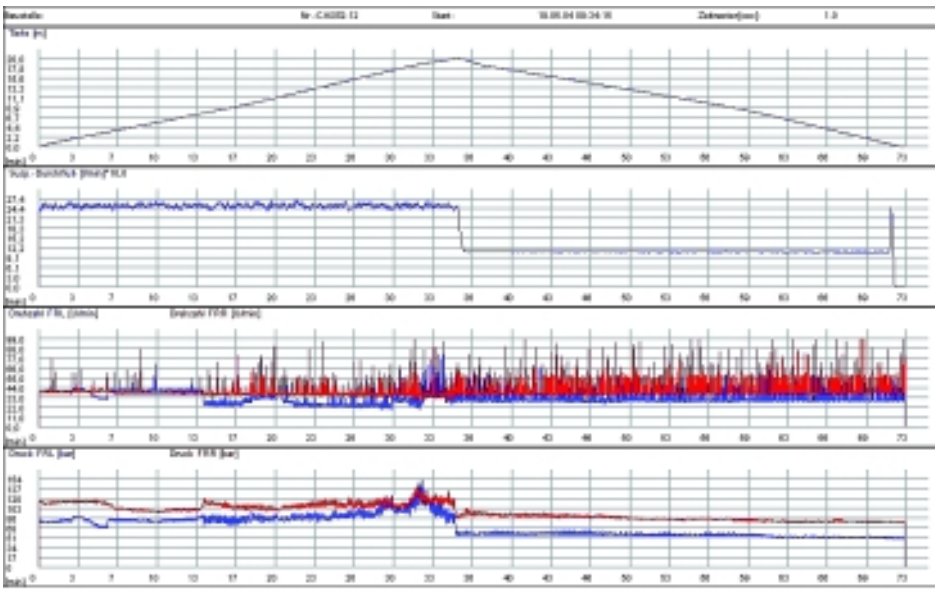
zione, invece, assai sostenuta.
In Fig. 21 è visibile una tipica schermata del sistema computerizzato di controllo e comando installato a bordo macchina, tramite il quale tutti i parametri operativi del test sono stati registrati ed analizzati. Le elevate performance produttive e qualitative sono state principalmente causate:

- dalla natura del suolo,
- dal grande volume di liquido che è stato iniettato nel mix suolo/cemento,
- all'azione dell'aria compressa che ha mantenuto la miscela turbolenta e fluida durante la lavorazione e
- dall'efficienza dell'attrezzatura utilizzata.

La consistenza del mix e la sua legatura furono ottime; un controllo visuale della qualità del lavoro, eseguito durante l'estrazione di alcuni pannelli, ha mostrato un mix omogeneo, molto di più di quello che ci si fosse aspettato.
Nella tabella riportata in Fig. 22, vengono evidenziati i parametri salienti del test in oggetto.

Fig. 20 - Vista della parte superiore delle paratie (Giappone)

Fig. 21 - Scheda tipica dei parametri registrati durante la lavorazione



2.5 CSM vs. Jet Grouting

Il metodo Cutter Soil Mixing, CSM, è una tecnica innovativa per il Soil Mixing profondo; è già stata largamente testata ed i primi cantieri sono in fase di avanzata realizzazione. Bauer sta attuando, inoltre, una ulteriore campagna di test per migliorare le macchine; sta preparando prove e modifiche per realizzare teste fresanti di diversa geometria con nuove lame e pale mescolatrici atte a rendere il lavoro più veloce e produttivo e ridurre i consumi; alcune Imprese Giapponesi stanno già applicando questo metodo in suoli differenti, così da ottimizzare le procedure costruttive ed i parametri di concentrazione dei fanghi Il metodo offre indubbiamente notevoli vantaggi rispetto alle normali tecniche di soil mixing che usano gli standard utensili rotanti. Basti pensare alla sostituzione del classico jet grouting; in Fig. 23 si può analizzare una comparazione geometrica relativa alle colonne/diaframmi sfruttando il CSM in contrapposizione alla vecchia tecnologia. L'utilizzo del CSM, in sostituzione del jet grouting, potrebbe apportare notevoli vantaggi, sia in termini di qualità che di costo, quali ad esempio:

- Notevole maggior produttività (il tempo che serve per scavare un pannello è circa quello necessario per effettuare una colonna jet grouting, parliamo per-

Pannello No.	Sequenza [m]	Profondità	Tempo di discesa	Tempo di risalita	Total time [min]	Vel. di discesa	Vel. di salita	a/c	Vol. tot di legante [l-l/m]	Produzione [m²/hr]
2/6	1	20	65 '	21 '	86'	media 31 max 50	95	2,2	15.200 l *760 l/m*	30,7
2/8b	1	19,4	29 '	19 '	48'	60 - 80	90-130	2,2	10.600 l *546 l/m*	53,3
2/7	2	18,7	25 '	19 '	44'	75	60-140	2,2	13.300 l *711 l/m*	56,1
2/9	2	20	43 '	21 '	64'	47	95	2,2	12.900 l *645 l/m*	41,3
2/11	2	20	36 '	19 '	55'	50 - 70	100	2,0	11.000 l *550 l/m*	48,0
2/10	1	20	43 '	28 '	71'	46 - 50	70	2,2	12.650 l *632 l/m*	37,2
2/13	2	20	37 '	26 '	63'	54	77	2,2	13.355 l *667 l/m*	42,0
2/12	1	20	35 '	37 '	72'	57	45 - 60	2,2	13.300 l *665 l/m*	36,7
2/5	1	19,4	43 '	17 '	60'	45 - 50	115	1,5	6.990 l *360 l/m*	42,7
2/4	2	20	39 '	18 '	57'	51	111	1,8	7.260 l *363 l/m*	46,3

Produzione media = 43,43 m²/h

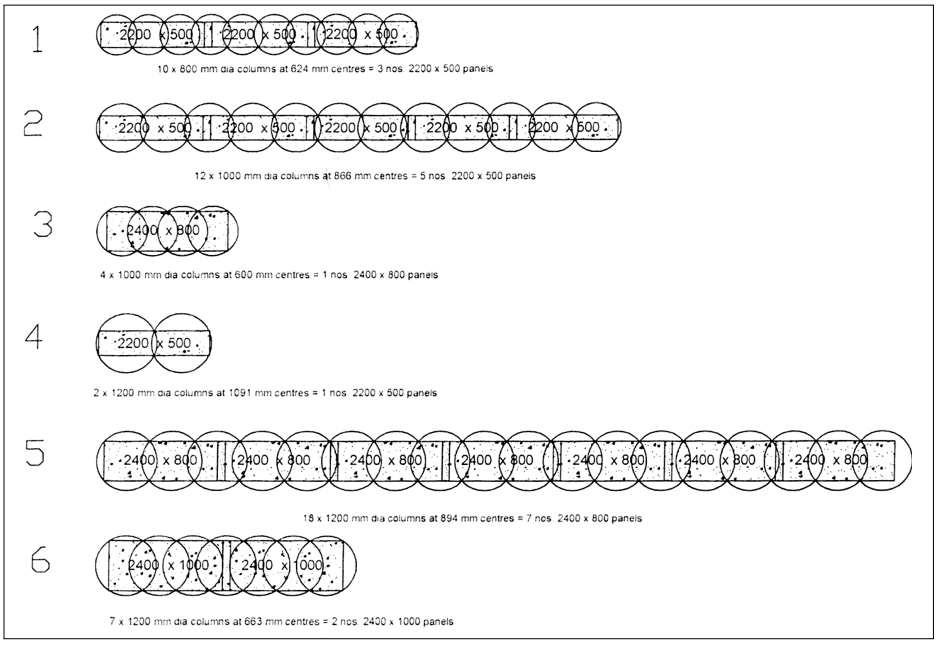
Fig. 22 - Dati rilevati a Tokyo

tanto della possibilità di raggiungere produzioni superiori nell'ordine del 200%).

- Notevole minor consumo in cemento (a causa dell'assenza di sovrapposizioni e zone periferiche iniettate non collaboranti, fenomeni inevitabili utilizzando le colonne jet grouting: il risparmio in cemento potrebbe raggiungere valori pari al 50%).
- Assenza del pericolo dei coni d'ombra, fenomeno che può frequentemente accadere utilizzando il principio della miscelazione idraulica (jet grouting) in formazioni geologiche che presentano materiali resistenti alla pressione di iniezione (non può succedere con il CSM, essendo una miscelazione meccanica).
- Possibilità di armare il pannello eseguito (con putrelle o gabbie eventualmente vibrate)
- Minori giunti, per cui minori pericoli di perdite.
- Possibilità di effettuare giunti "fresh on fresh".
- Lavoro eseguito sotto il principio del "environmentally friendly".

Il CSM rappresenta senza dubbio un'innovazione che passerà alla storia nel campo delle fondazioni!

Fig. 23 - Comparazione geometrica jet grouting / CSM



Grazie

Ing. Cesare Bernardini, Ing. Andrea Danese, Geom. Federico Pisano - Astaldi S.p.A.
Ing. Francesco Bellone, Geom. Ferdinando De Angelis - CIPA S.r.l.
Ing. Piero & Vittorio Petrucco, Ing. Luca Grillo - ICOP S.p.A.
Dr. Saverio Quadrio, Dr. Francesco Varni, Dr. Luigi Gonsalvi, Geom. Giulio Quas - Quadrio Curzio S.p.A.
Ing. Castelletti, Dr. Triggiani, Dr. Fazzini - RODIO S.p.A.
Dr. Guidi, Dr. Trampetti, Ing. Napoletano - S.I.F. S.p.A.
Ing. Stefano e Cesare Trevisani, Ing. Daniele Vanni, Ing. Gino Zanchini - Trevi S.p.A.
Ing. Erwin Stözer, Ing. Hubert Merkl, Ing. Christian Gress, Ing. Christian Heinecker, Dr. Wilhelm Ruby & Bobby Johann Eckert - Bauer Maschinen GmbH
Dr. Marco Dossi, Geom. Gianpiero Parodi - GeoTunnel S.r.l.

Bringiotti M., Guida al Tunnelling: l'Evoluzione e la sfida, Edizioni PEI, Parma, 2003, www.edizionipei.it
Bringiotti M., Bottero D., Consolidamenti & Fondazioni, Edizioni PEI, Parma, 2003, www.edizionipei.it
Bringiotti M., Dossi M., Tecnologia vincente per il Passante Ferroviario di Torino, I° parte, Quarry & Construction, Edizioni PEI, Parma, maggio 2002, www.edizionipei.it
Bringiotti M., Dossi M., Tecnologia vincente per il Passante Ferroviario di Torino, II° parte, Quarry & Construction, Edizioni PEI, Parma, giugno 2002, www.edizionipei.it
Stözer E., Joints for Diaphragm Walls, Bauer, Schrobenhausen, Novembre 2000.
Fiorotto R., Stötzer E., Schöpf M., C.S.M. An innovation in Soil Mixing for creating Cut-off and Retaining walls, Bauer, Schrobenhausen, Giugno 2004.
Stötzer E., Report for Diaphragm Wall Construction, Jobsite Berlin Lot 1.4, Bauer, Schrobenhausen, Maggio 1997.