Convegno formativo

Edilizia e infrastrutture viarie: progettare la sostenibilità

Economia circolare, materiali da riciclo e Criteri Ambientali Minimi (CAM) tra normativa, progettazione integrata e ciclo di vita delle opere

Roma, 16 novembre 2026 · Chiostro del Sangallo, Facoltà di Ingegneria civile e industriale

Trattamento a calce di terre condizionate da scavo meccanizzato: da rifiuto a risorsa

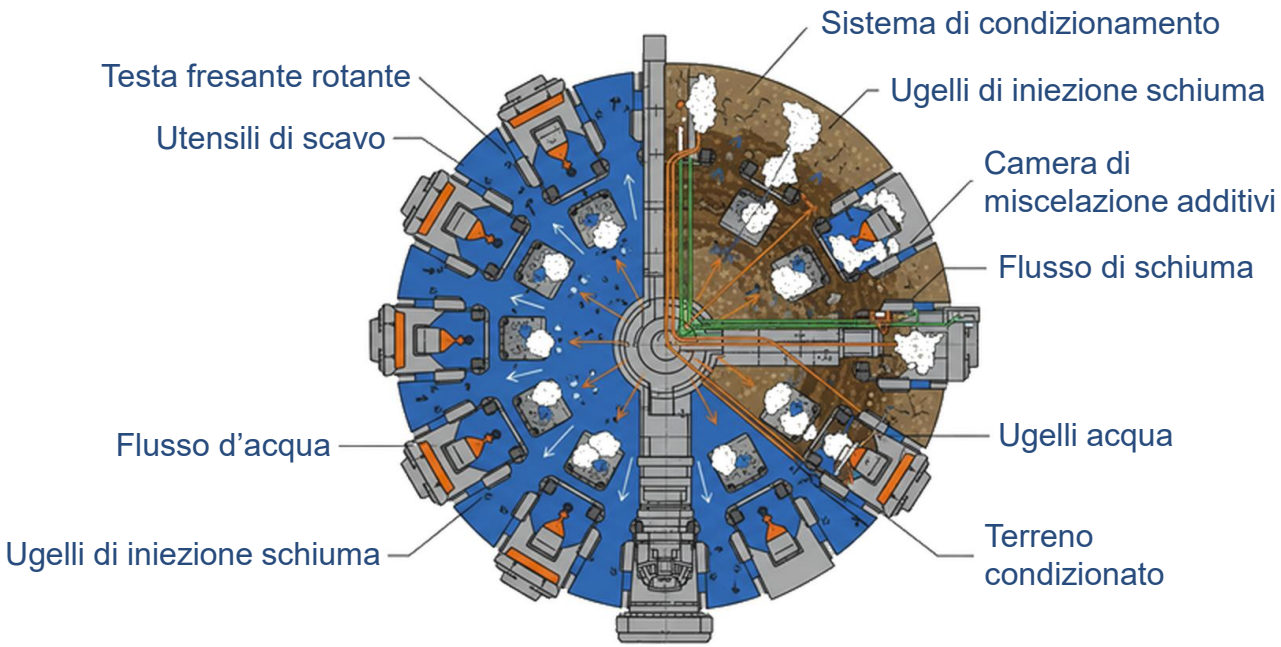
Giacomo Russo

Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse
Università di Napoli Federico II

DiSTAR Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

Lavorabilità delle terre condizionate

Terre condizionate da TBM: rifiuto o risorsa?



Agenti schiumogeni (tensioattivi) – producono schiuma e migliorano la plasticità del terreno

Polimeri – aumentano coesione e stabilità della massa

Lubrificanti – riducono l'attrito in camera di scavo e nel trasporto

Agenti anti-intasamento – evitano l'adesione delle argille a utensili e macchina

Acqua – regola umidità e lavorabilità del terreno scavato

Condizionamento ed elevato contenuto d'acqua rendono le terre da scavo meccanizzato problematiche

Scavo meccanizzato in Italia

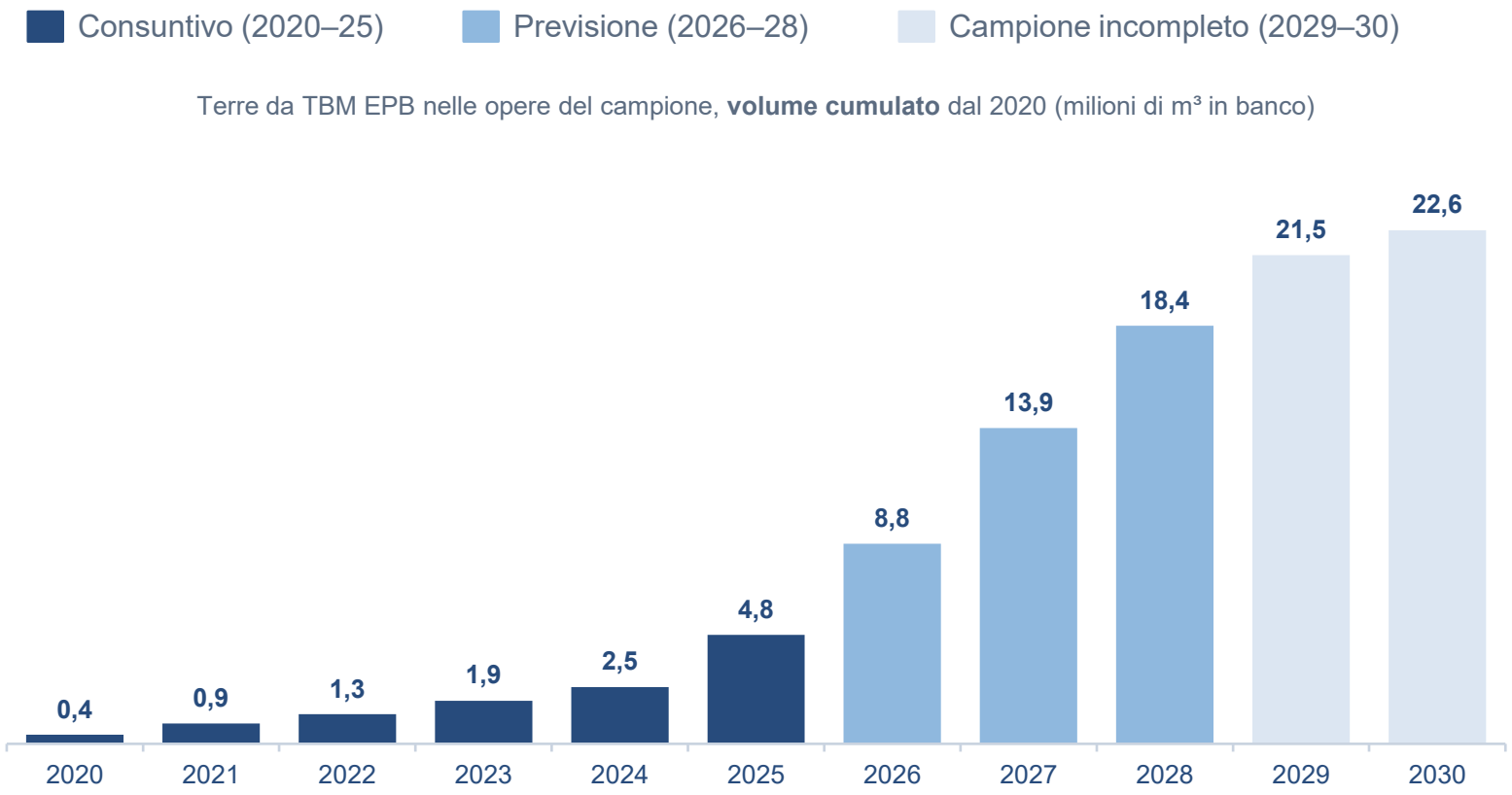
Otto grandi opere con TBM EPB: circa 285 km di gallerie scavate tra il 2020 e il 2030

Gruppo	Opere	km	Periodo	Mm³
Napoli–Bari	Gallerie Grottaminarda, Rocchetta, Melito, Orsara, Hirpinia	87	2023–2030	7,3
Sicilia	Palermo–Catania (lotti 1+2, 3, 4a, 4b), Messina–Catania	145	2024–2030	9,9
Salerno–Reggio Calabria	Lotto 1A Battipaglia–Romagnano, 8 gallerie	12	2025–2028	1,5
Nodi urbani	Passante AV Firenze, tunnel subportuale di Genova	17	2023–2030	2,1
Nord, opere concluse	Terzo Valico (quota 2020–2023), galleria Lonato	24	2020–2024	1,8
Totale		**285**	**2020–2030**	**22,6**

Stima prudente. Il campione esclude metropolitane, opere minori, cantieri non ancora appaltati e TBM da roccia: i volumi reali di terre condizionate sono più alti di quelli mostrati.

Scavo meccanizzato in Italia

Entro il 2028 circa 18 milioni di m³ di terre condizionate da gestire



≈ 5 Mm³

di terre da scavo con EPB dal 2020 al 2025

≈ 18 Mm³

attese al 2028: quasi il quadruplo in tre anni

Esclusa la roccia scavata con TBM da roccia (Brennero, Fortezza–Ponte Gardena, Trento, Torino–Lione). Volume teorico in banco = π·D²/4 × km scavati; il materiale sciolto è circa il 20–40% in più. Previsione da cronoprogrammi pubblici, incertezza circa ±30%. Dopo il 2028 la crescita rallenta perché il campione non include le opere ancora da appaltare.

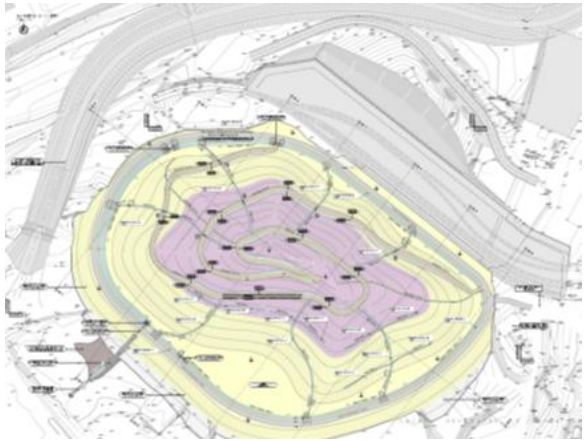
Il caso di studio

Dal Passante AV di Firenze alla collina schermo

Origine – terre condizionate dallo scavo con TBM EPB delle gallerie del Passante AV di Firenze, trasferite in treno

Destinazione – ex miniera di lignite Enel di Santa Barbara, Cavriglia (AR): riambientalizzazione con una collina schermo

Volume – circa 1,5 milioni di m³ di terre del Passante (gallerie e stazione AV) previsti nel progetto della collina



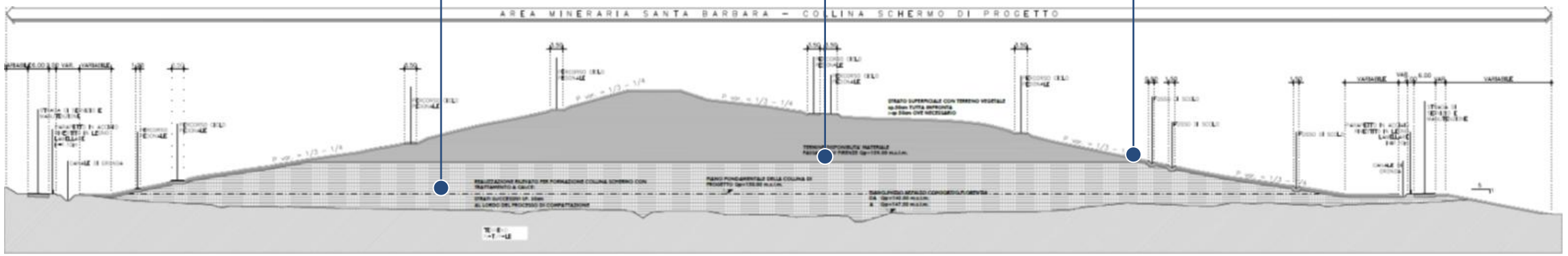


Planimetria e vista di progetto

Terre dallo scavo TBM del Passante

Fine delle terre disponibili dal Passante

Terreno vegetale superficiale, 30–50 cm



Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

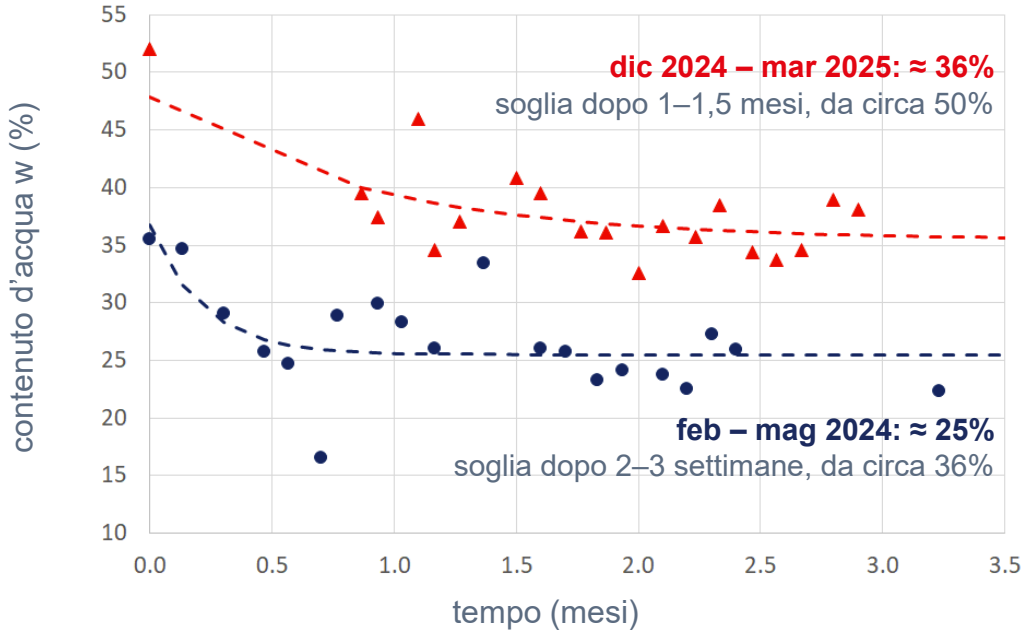
Il materiale non è lavorabile



Video 10 s: scarico nelle baie coperte



Le baie del deposito coperto



Consistenza fluida e difficile essiccamento all'aria: anche al coperto il materiale resta troppo umido per essere steso e compattato

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Il materiale non è sormontabile da mezzi d'opera



Video 15 s: transito di un mezzo d'opera



Il materiale rifluisce sotto il carico del mezzo



Orma di un piede: cede anche sotto una persona

Lavorabilità · palabilità, possibilità di compattare e di sormontare il materiale con mezzi d'opera

Il materiale non sostiene il passaggio di un mezzo d'opera: **non è lavorabile.**

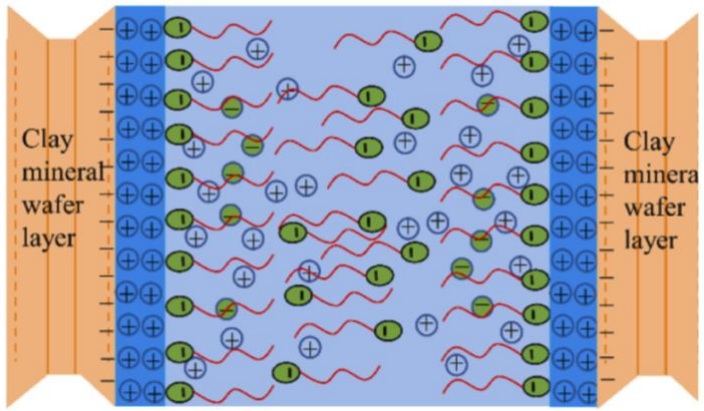
Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

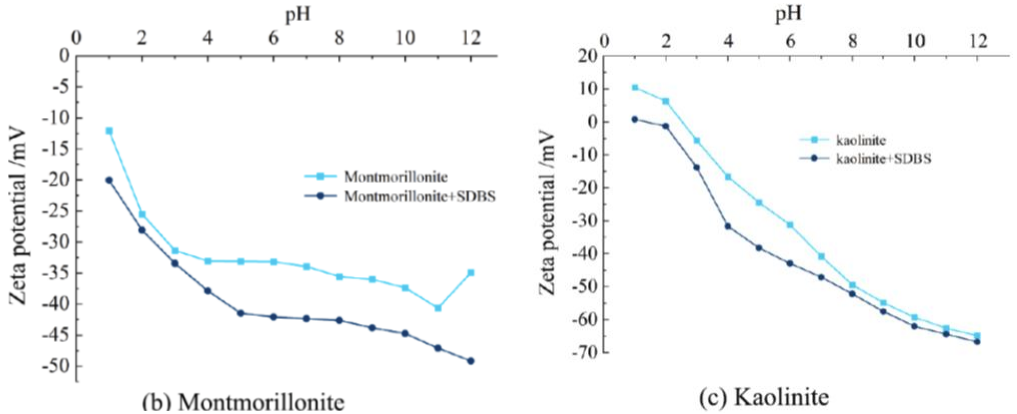
MARRADI CONSULTING PARTNERS

Effetto del condizionamento

Il condizionamento favorisce una microstruttura dispersa



Tensioattivo anionico adsorbito tra le lamelle argillose



Potenziale zeta in funzione del pH, senza e con SDBS (tensioattivo anionico)

Il potenziale zeta aumenta in campo negativo per ogni valore di pH

1 Tensioattivi anionici
adsorbiti sulle particelle argillose

2 Carica più negativa
aumenta la repulsione tra le particelle

3 Dispersione
microstruttura dispersa

4 Ritenzione idrica
maggiore capacità di ritenere acqua

La microstruttura indotta dal condizionamento può essere modificata?

Fonte ed elaborazione da: Zhuo et al. (2023)

Trattamento a calce

Effetti indotti dall'addizione di calce

Terreno

Acqua

Calce

Miscela

$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + \text{calore}$

$Ca(OH)_2 \rightarrow \mathbf{Ca^{2+} + 2\ OH^-}$

pH ≈ 12,4

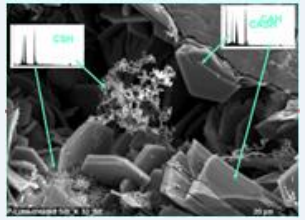
Da subito

Scambio cationico e flocculazione

Ca^{2+} sostituisce i cationi adsorbiti: le particelle si aggregano

Da minuti a mesi, secondo la mineralogia

Reazioni pozzolaniche: gel CSH e CAH



SEM: prodotti CSH

Terreno trattato

miscelazione

idratazione e dissociazione

scambio cationico, flocculazione, reazioni pozzolaniche

tempo

Argille reattive (es. smectiti): scambio cationico e reazioni pozzolaniche con tempi comparabili – Vitale et al. (2017), Appl. Clay Sci. 141, 36–45

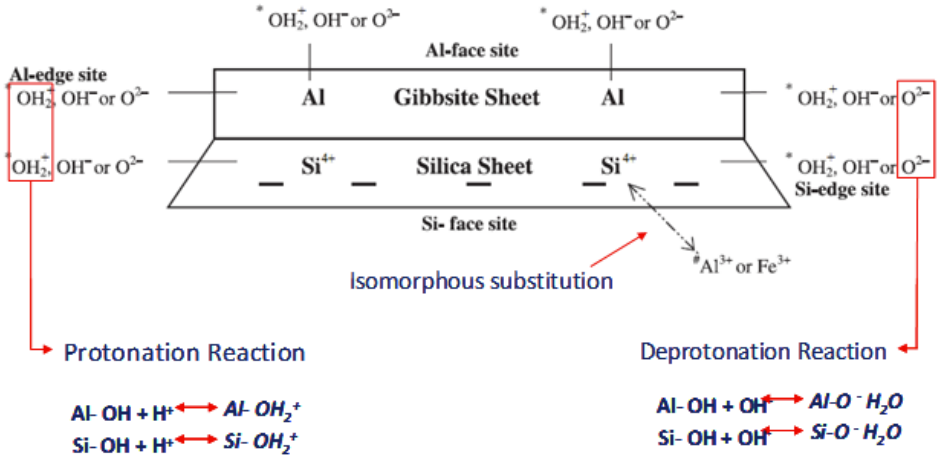
Trattamento a calce

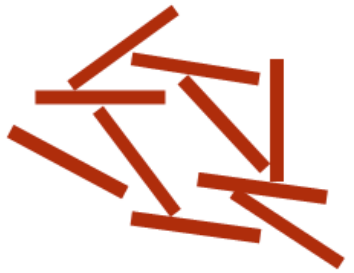
La calce aggrega le particelle argillose

Flocculazione e aggregazione · attrazione di van der Waals, repulsione del doppio strato, forze elettrostatiche coulombiane

1 *Effetto del pH*

Il pH regola protonazione e deprotonazione dei siti di bordo, e quindi l'interazione coulombiana tra le particelle. **Con la calce il pH aumenta verso 12,4.**

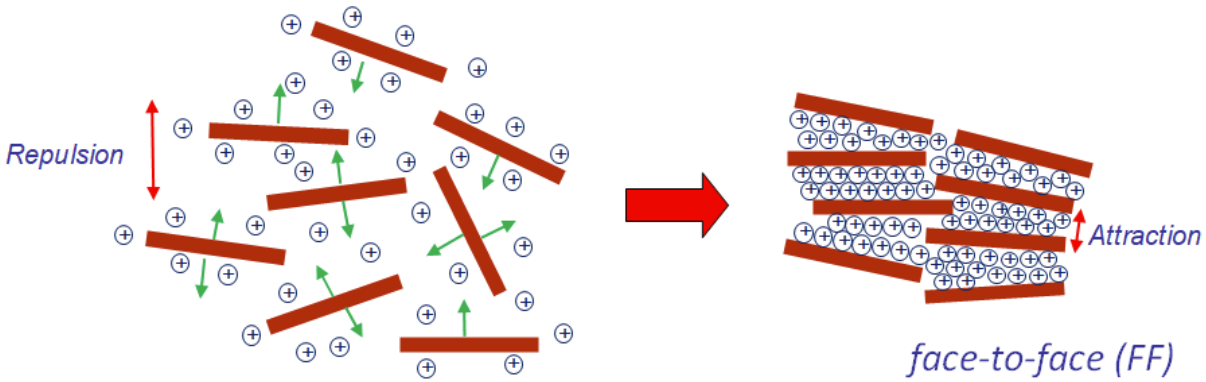




edge-to-face (EF)
edge-to-edge (EE)

2 *Effetto del Ca^{2+}*

Il Ca^{2+} riduce la carica negativa e la repulsione: prevalgono le forze di van der Waals e le particelle si impilano. **Gli aggregati di lamelle formano i flocculi.**

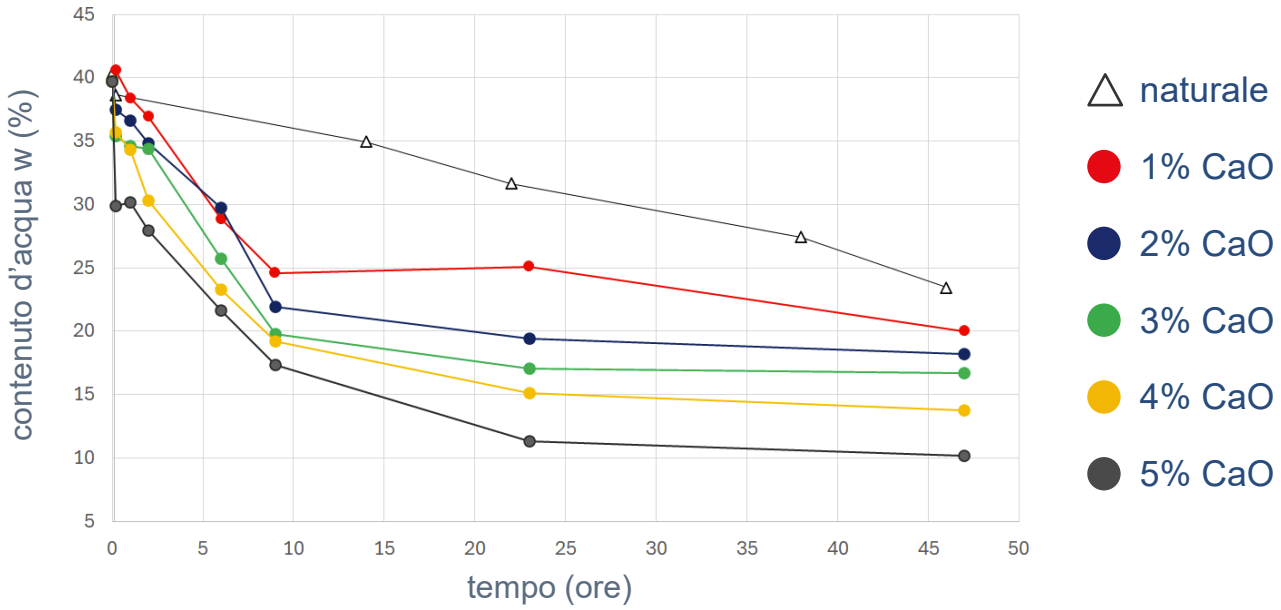


face-to-face (FF)

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Effetti dell'aggregazione sull'essiccamento

Prova di laboratorio · terreno condizionato della collina con calce viva dall'1 al 5% di CaO, essiccato in laboratorio fino a 48 ore



Subito

con 5% CaO da circa 40% a 30% alla miscelazione

→ ***idratazione della calce viva e calore***

Entro 9 ore

sotto il 25%; senza calce servono circa 2 giorni

→ ***aggregazione: cede acqua più facilmente***

20% → 10%

a 47 ore, da 1% a 5% di CaO

→ ***limite plastico più alto: minore ritenzione***

Anche con percentuali ridotte di calce **il contenuto d'acqua si riduce** più rapidamente

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

La soluzione: trattamento a calce in due fasi







1 · Smarino condizionato → **2 · Pre-trattamento a calce** → **3 · Stabilizzazione a calce**

Il problema

materiale fluido, non essicca e non è percorribile dai mezzi

→ Lavorabilità

riduce acqua e plasticità: il materiale diventa movimentabile e percorribile

→ Prestazioni meccaniche

portanza e resistenza richieste per il rilevato della collina

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

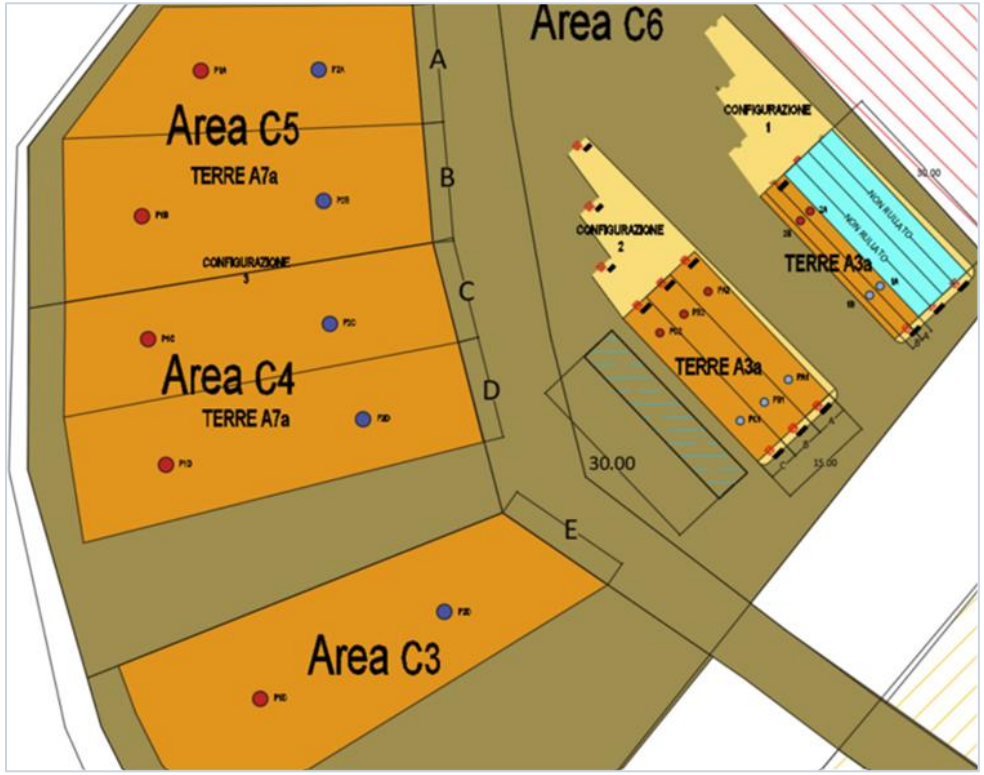
Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Il campo prova: pre-trattamento del materiale A7a

Obiettivo · verificare in scala reale la lavorabilità ottenuta con la miscela scelta e fissare metodo e modalità operative



Planimetria del campo prova: aree C4 e C5 in terre A7a

Materiale A7a

Classificazione	**A7-6**
Fini < 0,063 mm	**46,5%**
Limite liquido	**44,0%**
Limite plastico	**26,3%**
Indice di plasticità	**17,7%**
CIC	**4,0%**
Sostanza organica	**1,1%**
Solfati solubili	**< 0,02%**

Pre-trattamento

CaO su peso secco	**3%**
Spessore strato	**30–35 cm**
Fresatura	**1 passata**
w iniziale	**27,5–32,5%**
Misure di w	**ogni 2 h**
	poi ogni 6 h

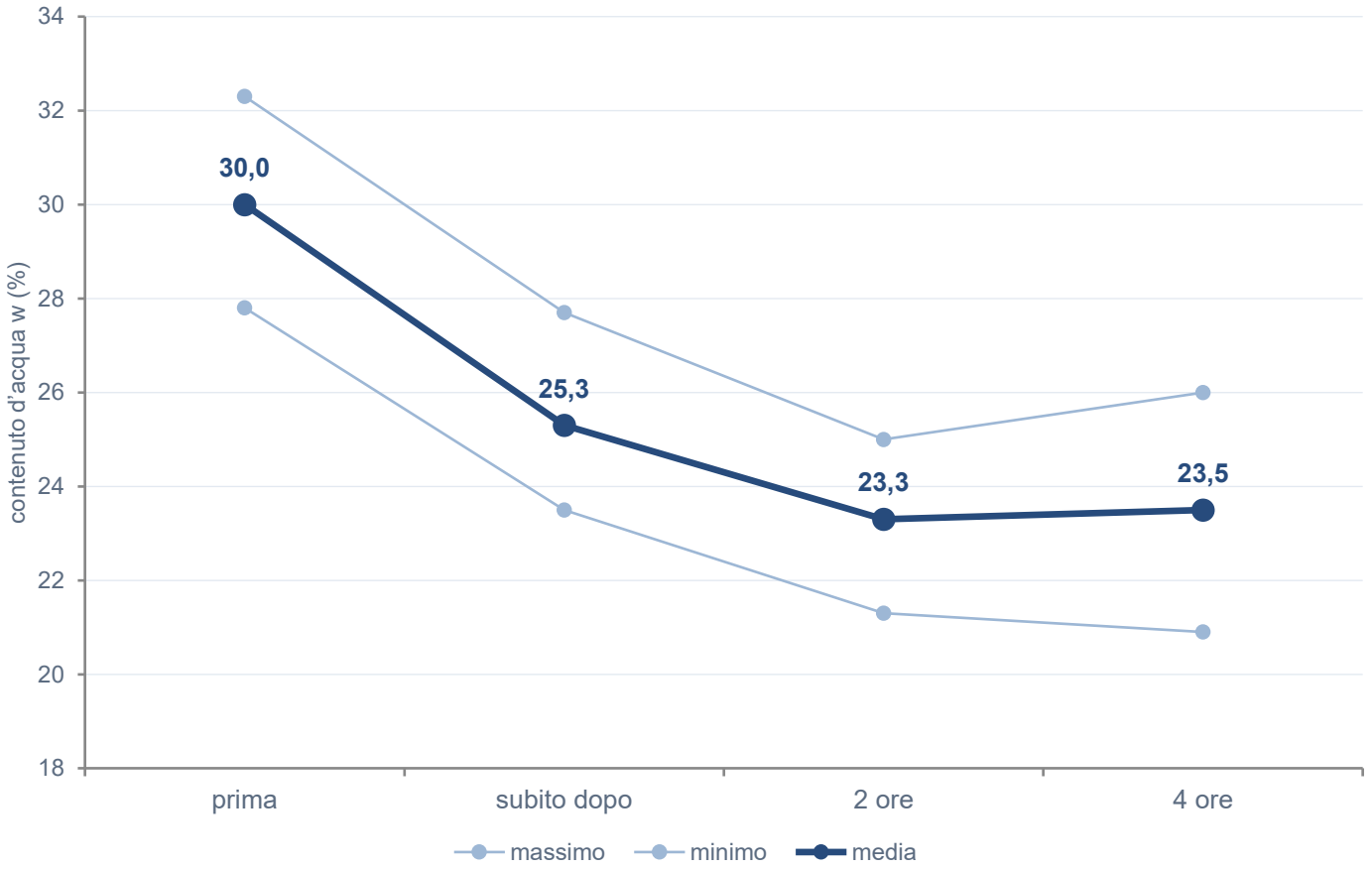
Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Effetti del pre-trattamento a calce



Media e intervallo min–max dei punti di misura, aree C4 e C5 · 3% CaO · 1 passata di fresatura

Circa 5 punti in meno

alla fresatura: da circa 30% a circa 25% in media

→ ***idratazione della calce e calore***

Circa 23% dopo 2 ore

circa 7 punti in meno rispetto a prima del trattamento; a 4 ore il valore è stabile

→ ***il materiale cede acqua più facilmente***

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Dopo il pre-trattamento il materiale si può sormontare



Video 19 s: passaggio del pulvimixer e verifica a piedi

Stessa finestra temporale: dalla fresatura con la calce alle prime ore → t

↓ *Contenuto d'acqua*

−7 punti in 2 ore

in campo da circa 30% a 23%, con 3% CaO e una passata di fresatura

→ ***idratazione della calce e aggregazione***

Campo prova, aree C4 e C5

↑ *Consistenza*

Non si affonda

subito dopo la fresatura si cammina sul materiale; prima il piede vi lasciava un'orma profonda

→ ***flocculazione per effetto del Ca^{2+}***

Osservazione in sito, collina di Santa Barbara

Mentre il contenuto d'acqua si riduce, **il materiale acquista consistenza e torna lavorabile.**

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Il campo prova: stabilizzazione del materiale pre-trattato

Obiettivo · verificare in scala reale le prestazioni meccaniche della miscela; lavorazioni conformi al Capitolato RFI, Sezione 18

Miscela e posa – materiale A7a

CaO in stabilizzazione	**3%**
Spessore dello strato	**50 cm**
Inizio del trattamento	**≥ 24 h dal pre-trattamento**
Contenuto d'acqua ottimo	**26,7%**
Peso di volume secco max	**14,71 kN/m³**

Controlli nel tempo

T0 — **dopo il compattamento**
Densità in sito
Contenuto d'acqua
Piastra Md > 40 MPa

1 g — **dopo 24 ore**
Piastra Md > 40 MPa

7 g — **dopo 7 giorni**
Piastra Md > 40 MPa
Compressione uniassiale su provini prelevati sul rilevato

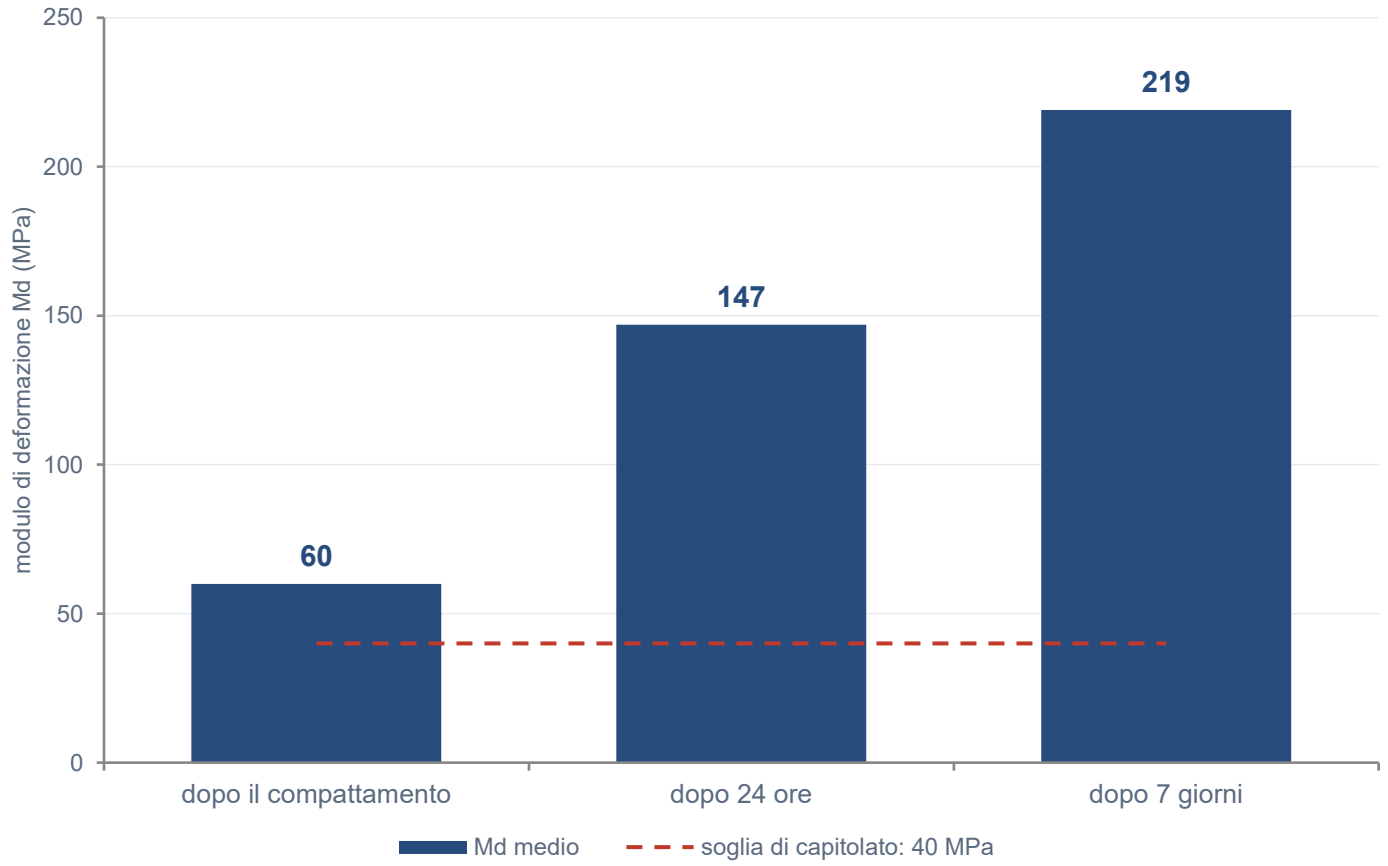
Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Evoluzione del modulo Md da prove su piastra



Circa 60 MPa

subito dopo il compattamento: 7 prove su 8 già sopra la soglia di 40 MPa

× 2,5 in 24 ore

circa 147 MPa; tutte le prove sopra la soglia

× 3,6 in 7 giorni

circa 219 MPa, oltre 5 volte la soglia di capitolato

Medie delle prove nelle aree C4 e C5: 8 prove (30–107 MPa), 4 prove (86–200), 2 prove (195–242)

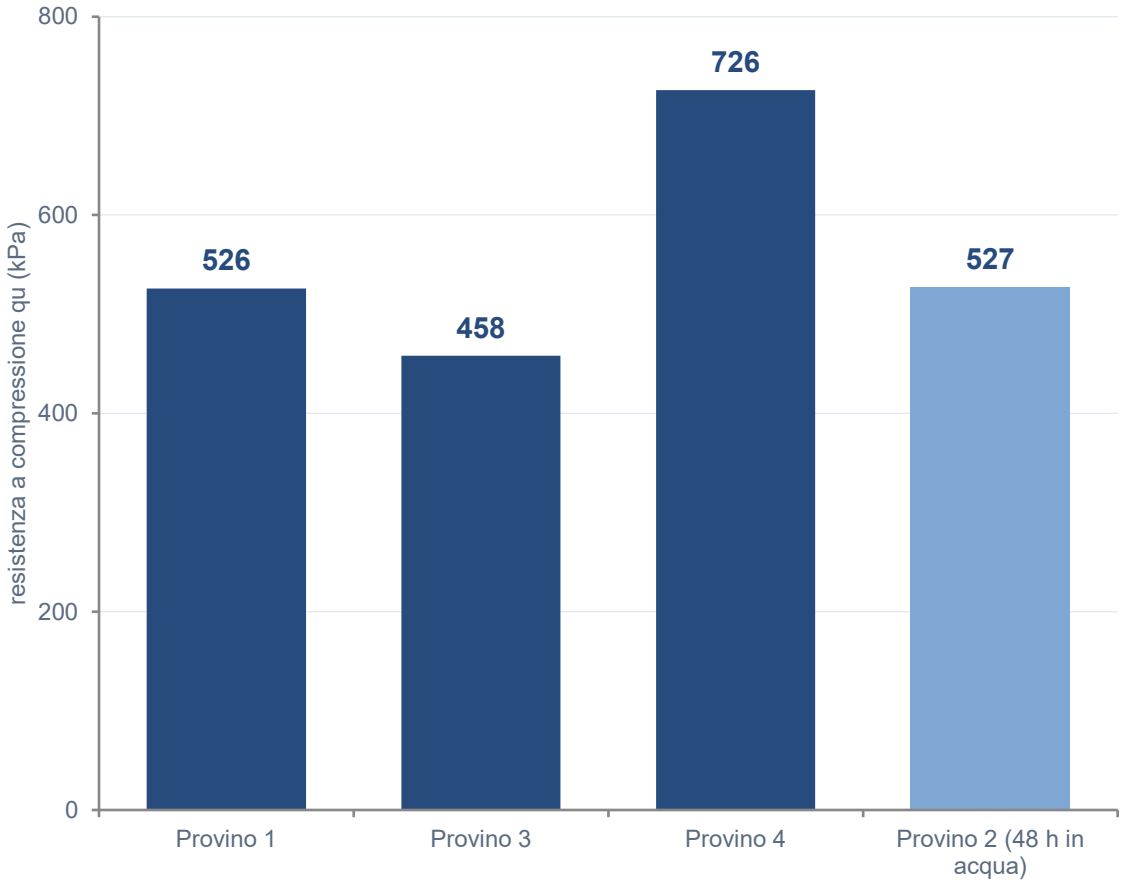
Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

Compressione uniassiale su provini dal rilevato di prova





Provini dopo la rottura

≈ 570 kPa

media dei tre provini maturati in sito; rottura al 2,8–3,8% di deformazione

→ ***materiale legato***

527 kPa

dopo 48 ore in acqua: in linea con i provini asciutti

→ ***stabile in acqua***

Provini Ø 84 mm prelevati dal rilevato di prova, area C4, maturati in sito 7 giorni

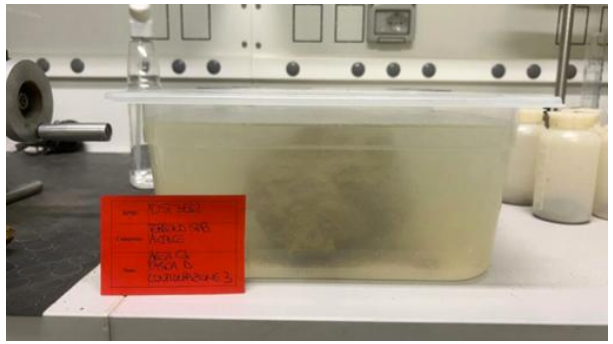
Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Il caso di studio: collina schermo di Santa Barbara

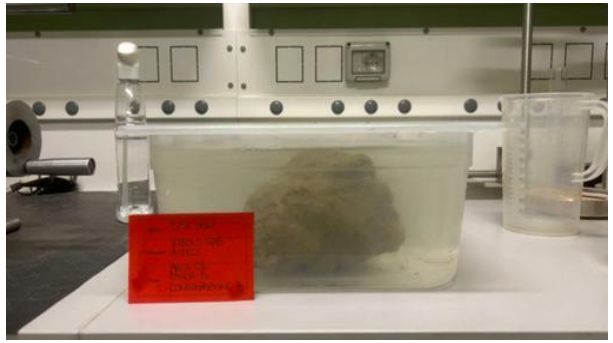
Stabilità in acqua del campione dal rilevato



inizio prova



dopo 12 ore



dopo 24 ore



dopo 48 ore

48 giorni in sito, 48 ore in acqua

campione maturato nel rilevato di prova e poi immerso

→ ***prova di stabilità in acqua***

Forma conservata

dopo 48 ore il campione non si è disgregato

→ ***struttura indotta dal compattamento viene mantenuta***

Campione prelevato dallo strato stabilizzato, area C4, dopo 48 giorni di maturazione in sito

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Conclusioni

Le terre condizionate possono diventare una risorsa

≈ 18 Mm³
terre da TBM EPB attese in Italia entro il 2028

2 ore
in campo, da circa 30% a 23% di contenuto d'acqua

× 3,6
modulo Md in 7 giorni, oltre 5 volte la soglia

≈ 570 kPa
resistenza a 7 giorni, conservata dopo 48 ore in acqua

1 *Il problema è la microstruttura*

i condizionanti disperdono l'argilla: il materiale trattiene acqua e l'essiccamento naturale si ferma

2 *Due fasi, due obiettivi*

pre-trattamento sotto il consumo iniziale di calce per la lavorabilità; stabilizzazione oltre, per le prestazioni

3 *Il campo prova come metodo*

dosaggi, tempi e mezzi si verificano in scala reale prima della produzione

Le terre condizionate possono essere reinserite validamente nel processo costruttivo: **meno discarica, meno materiale di cava.**

Caso di studio: Passante AV di Firenze – collina schermo di Santa Barbara, Cavriglia (AR)

Consorzio Florentia

MARRADI CONSULTING PARTNERS

Convegno formativo

Edilizia e infrastrutture viarie: progettare la sostenibilità

Economia circolare, materiali da riciclo e Criteri Ambientali Minimi (CAM) tra normativa, progettazione integrata e ciclo di vita delle opere

Roma, 16 novembre 2026 · Chiostro del Sangallo, Facoltà di Ingegneria civile e industriale

Trattamento a calce di terre condizionate da scavo meccanizzato: da rifiuto a risorsa

Giacomo Russo

Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse
Università di Napoli Federico II

DiSTAR Dipartimento di Scienze della Terra, dell'Ambiente e delle Risorse

Appendice – le opere considerate

Volumi scavati con TBM 2020–2030 per opera

Opera	TBM	Ø (m)	km 2020–30	Periodo	Mm³
Terzo Valico (TBM EPB, quota 2020-23 stimata)	**EPB**	9,77	14,0	2020–2023	1,05
AV Brescia-Verona, galleria Lonato	**EPB**	10,03	9,5	2020–2024	0,75
Napoli-Bari, Grottaminarda	**EPB**	12,50	2,0	2023–2024	0,24
Napoli-Bari, Rocchetta	**EPB**	12,20	6,5	2024–2026	0,75
Napoli-Bari, Melito	**EPB**	12,50	4,4	2026–2027	0,54
Napoli-Bari, Orsara (2 canne)	**EPB**	9,92	19,7	2024–2028	1,53
Napoli-Bari, Hirpinia (2 canne, 4 TBM)	**EPB**	10,00	54,0	2026–2030	4,24
Palermo-Catania, lotti 1+2, 3, 4a, 4b	**EPB**	9,35	101,0	2024–2030	6,93
Messina-Catania (dual mode)	**EPB**	9,30	44,0	2024–2030	2,99
Salerno-Reggio C., lotto 1A (TBM ~13 m)	**EPB**	13,00	8,9	2025–2028	1,18
Salerno-Reggio C., lotto 1A (TBM ~10 m)	**EPB**	10,00	3,5	2025–2027	0,27
Passante AV Firenze (2 canne)	**EPB**	9,40	10,0	2023–2027	0,69
Tunnel subportuale Genova (2 canne)	**EPB**	16,00	7,0	2027–2030	1,41
BBT lotto Mules 2-3, TBM Virginia	Roccia	10,71	12,8	2020–2023	1,15
BBT lotto Mules 2-3, TBM Flavia	Roccia	10,71	13,1	2020–2025	1,18
BBT cunicolo esplorativo, TBM Serena	Roccia	6,30	5,0	2020–2021	0,16
Fortezza-Ponte Gardena (4 TBM)	Roccia	9,68	43,0	2025–2029	3,16
Circonvallazione di Trento (4 TBM dual mode)	Roccia	10,00	21,0	2027–2029	1,65
Torino-Lione, lato Italia	Roccia	10,16	15,0	2027–2030	1,22
Totale			**394**	**2020–2030**	**31,1**

km = lunghezza scavata con TBM nel periodo 2020–2030 (doppia canna contata due volte). Mm³ = volume teorico in banco. Le opere con periodo successivo al 2025 sono previsioni.

Appendice – ipotesi e fonti

Come sono stati ricostruiti i volumi

- Volume teorico in banco = π·D²/4 × lunghezza scavata con TBM, con il diametro di scavo dichiarato; nessun coefficiente di rigonfiamento.
- Ripartizione annua lineare tra avvio e fine scavo dichiarati; dove mancano le date, velocità medie di 8–12 m al giorno per TBM.
- Terzo Valico: 28 km con 4 EPB in totale, di cui circa 14 km stimati nel 2020–2023. Brennero: 3 TBM per quasi 43 km, ripartiti sugli anni di scavo.
- Palermo–Catania: km scavati stimati dalle lunghezze delle gallerie per lotto (doppia canna) e dalla quota meccanizzata (68–90%). Hirpinia: 27 km a doppia canna con 4 EPB, avvio ipotizzato nel 2026.
- Classi: EPB = terre condizionate con schiume e polimeri (pertinenti per la calce); Messina–Catania (dual mode) assegnata a EPB. Roccia = Brennero, Fortezza–Ponte Gardena, Trento (dual mode in roccia), Torino–Lione.
- Escluse: metropolitane (M4 Milano, Metro C Roma), opere idrauliche, opere non appaltate. Incertezza: circa ±15% sul consuntivo, circa ±30% sulla previsione.

Fonti principali

- RFI/Gruppo FS e Italferr, comunicati: galleria Lonato (2020–2024); Napoli–Bari (Grottaminarda 2024, Rocchetta mag. 2026, Melito set. 2026); Passante AV Firenze (2023–2026); Salerno–Reggio C. lotto 1A (dic. 2025); Fortezza–Ponte Gardena (mag. 2026); Messina–Catania (2024–2026)
- Webuild: schede Napoli–Bari (lug. 2026), Terzo Valico, Salerno–Reggio C., tunnel subportuale di Genova
- Pizzarotti: TBM Marina e Lucia, galleria Orsara (2024–2025)
- RFI, Ordine Ingegneri Palermo (mar. 2024); Ghella e Tunnelbuilder: TBM Palermo–Catania
- BBT SE e Ghella: TBM Virginia, Flavia, Serena (2025)
- TELT (mar. 2026), Pagella Politica (2026): Torino–Lione; RFI e l'Adige: Circonvallazione di Trento
- Tunnels & Tunnelling: Terzo Valico (4 EPB, Ø 9,77 m)