



Quest'opera è distribuita con Licenza
Creative Commons Attribuzione - Non commerciale -
Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

COMPORAMENTO IDRO-MECCANICO DI TERRENI ARGILLOSI TRATTATI MEDIANTE ADDITIVI TRADIZIONALI E INNOVATIVI

Marco ROSONE, Ph.D.
Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
(marco.rosone@unipa.it)



XII Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici
Università degli studi di Padova, Padova
31 Maggio - 1 Giugno 2023



1


Sommario della Presentazione



- Introduzione
- Metodi tradizionali per il trattamento dei terreni argillosi
- Metodi innovativi per il trattamento dei terreni argillosi
- Conclusioni e sviluppi futuri

2

Sostenibilità



Reddittività economica


Target

Protezione ambientale

Goal

Equità sociale


Target



Rapporto Brundtland (1987)

Agenda 2030 per lo Sviluppo Sostenibile è un **programma d'azione per le persone, il pianeta** approvato dall'Assemblea Generale dell'ONU (2015).

Realizzare una buona base comune da cui partire per costruire un mondo diverso e dare a tutti la possibilità di vivere in un mondo sostenibile dal punto di vista ambientale, sociale, economico



United Nation Sustainable Development Goals

3

Sviluppo sostenibile: una sfida globale





SUSTAINABLE DEVELOPMENT GOALS

13: Lotta contro il cambiamento climatico

Take urgent action to combat climate change and its impacts. Soil can play a positive role in reducing the impacts of climate change, by sequestering CO2, sustainably managing the resource and restoring degraded soils.

12: Consumo e Produzione responsabile

Ensure sustainable consumption and production patterns; through making sure chemicals and waste does not make its way into the air, water and soil, which can have adverse impacts on our health and environment. That is why it is important to sustainably manage and efficiently use soil resources.

9: Sostenibilità imprese innovazione e infrastrutture

Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation.

6: Acqua pulita e servizi igienico-sanitari

Ensure availability and sustainable management of water and sanitation for all; by preserving soil quality because of the role it plays in holding to provide clean water for drinking and agriculture.



United Nation Sustainable Development Goals

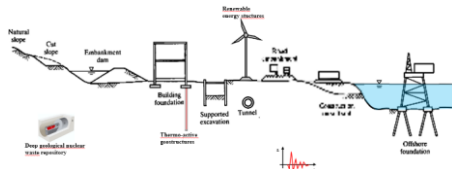
www.un.org

4

Sviluppo sostenibile: geotecnica



Ingegneria geotecnica



Transizione ecologica

- Produzione attraverso processi efficienti e con ridotte emissioni inquinanti
- Inesistenza di emissioni nocive dopo la messa in opera
- Lunga durata e riciclabilità al momento dello smaltimento



Processo di innovazione tecnologica e rivoluzione ambientale volto a favorire l'economia e lo sviluppo nel rispetto dell'ambiente e della sua sostenibilità

www.un.org; www.lumi4innovation.org

5

Stabilizzazione dei terreni



Minimizzare l'utilizzo di risorse non rinnovabili



Ogni anno estratti in Italia:

- 29M m³ sabbia e ghiaia
- 26.8M m³ calcare
- 6.2M m³ pietre ornamentali

Rapporto Cave Legambiente (2021)

oltre l'80% dei rifiuti inerti in Italia viene smaltito in discarica.

Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici, APAT (2021)

6

Stabilizzazione dei terreni



Ridurre le emissioni inquinanti



Il riutilizzo delle terre e rocce da scavo consentirebbe di risparmiare fino a 14 kg/ton di CO₂ e 250 MJ/ton di energia non rinnovabile (riduzione trasporto, smaltimento in discarica ed estrazione dalle cave).

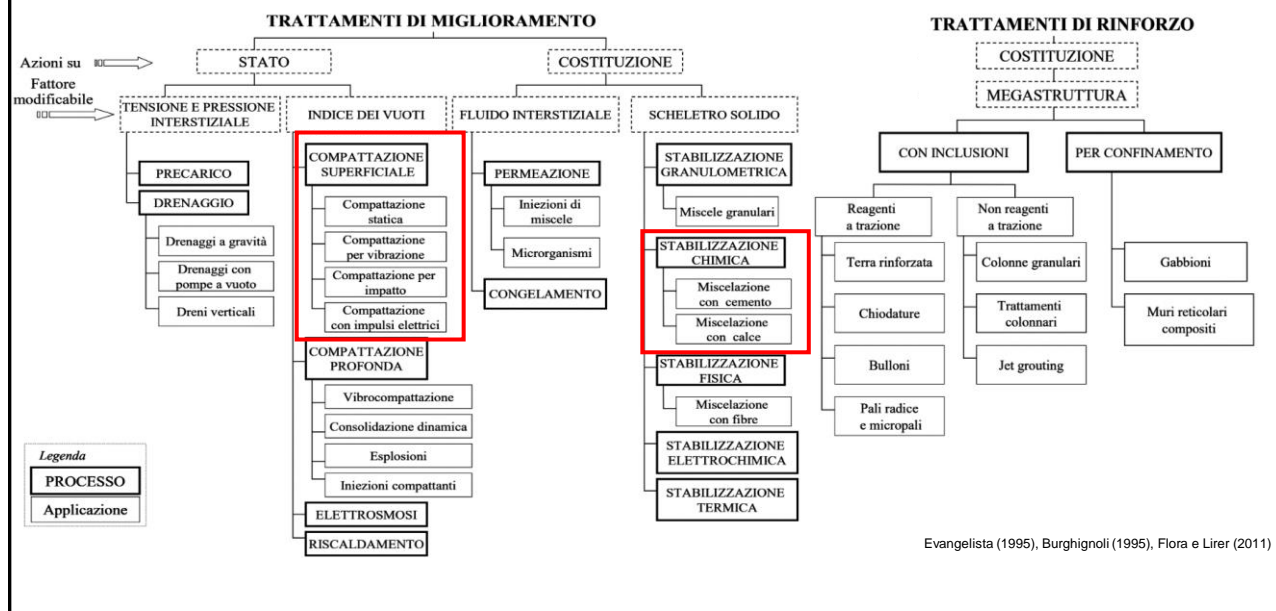
Blengini & Garbarino (2010)

7

Miglioramento e stabilizzazione dei terreni



Classificazione



8

Tattamento dei terreni argillosi

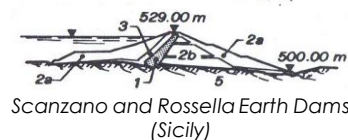
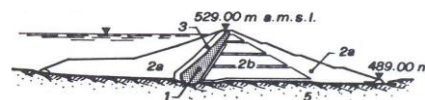
Compattazione argilla a scaglie



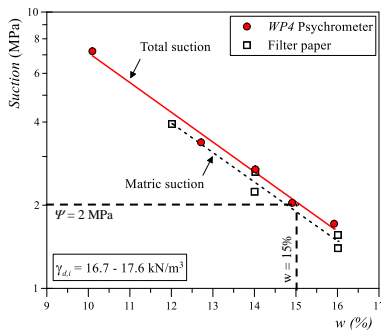
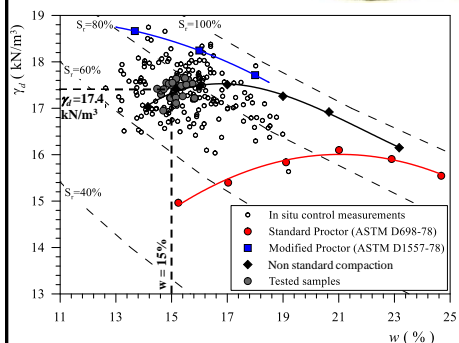
Argilla essiccata



Argilla compattata



Scanzano and Rossella Earth Dams (Sicily)



Airò Farulla et al. (2010); Rosone (2011)

9

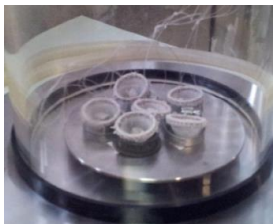
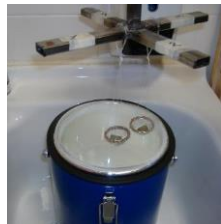
Caratterizzazione microstruttura

Tecnica Sperimentale

MIP: analisi quantitativa porosità intrusa e distribuzione dei pori
PASCAL 140-240 series ($p_{max} = 200 \text{ MPa}$)



SEM: analisi qualitativa forma, dimensione e distribuzione particelle
FEI Quanta 200f (max 100000X)

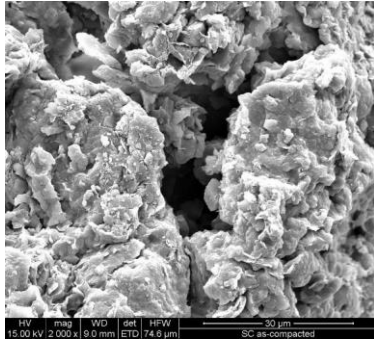


FREEZE-DRYING:
(congelamento per immersione in azoto liquido e sublimazione a $T = -60^\circ\text{C}$)
Lyophilizer LIO 5P

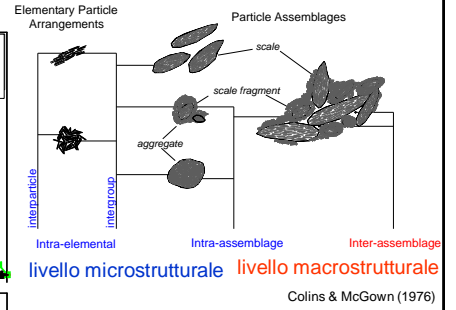
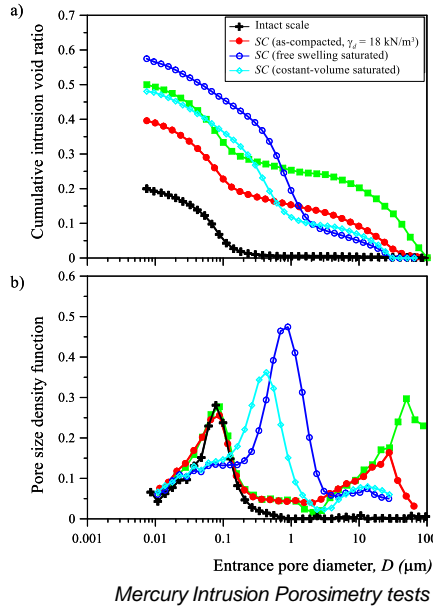
10

Treatment of clay soils

Compaction of clay: double structure



Provino As-compacted (SEM observation 2000 x)



Colins & McGown (1976)

Rosone et al. (2016)

11

Treatment of clay soils

Idromechanical behavior of compacted clays

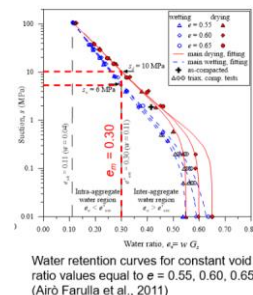
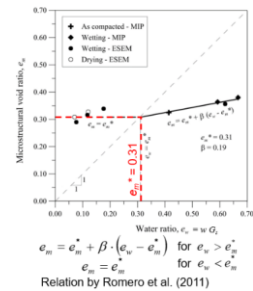
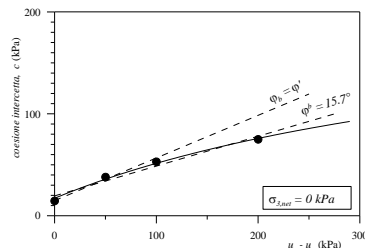
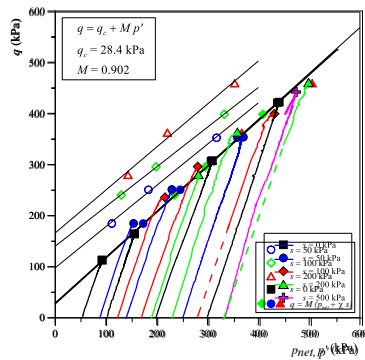


Cella triassiale (Bishop-Wesley) USP a stress path e suzione controllata

$$\sigma'_{ij} = \sigma_{ij} - u_a \delta_{ij} + S_{RM} (u_a - u_w) \cdot \delta_{ij}$$

$$S_{RM} = \frac{e_w - e_m}{e - e_m}$$

$$q = q_c + (p_{net} + S_{RM} \cdot s) \cdot M$$

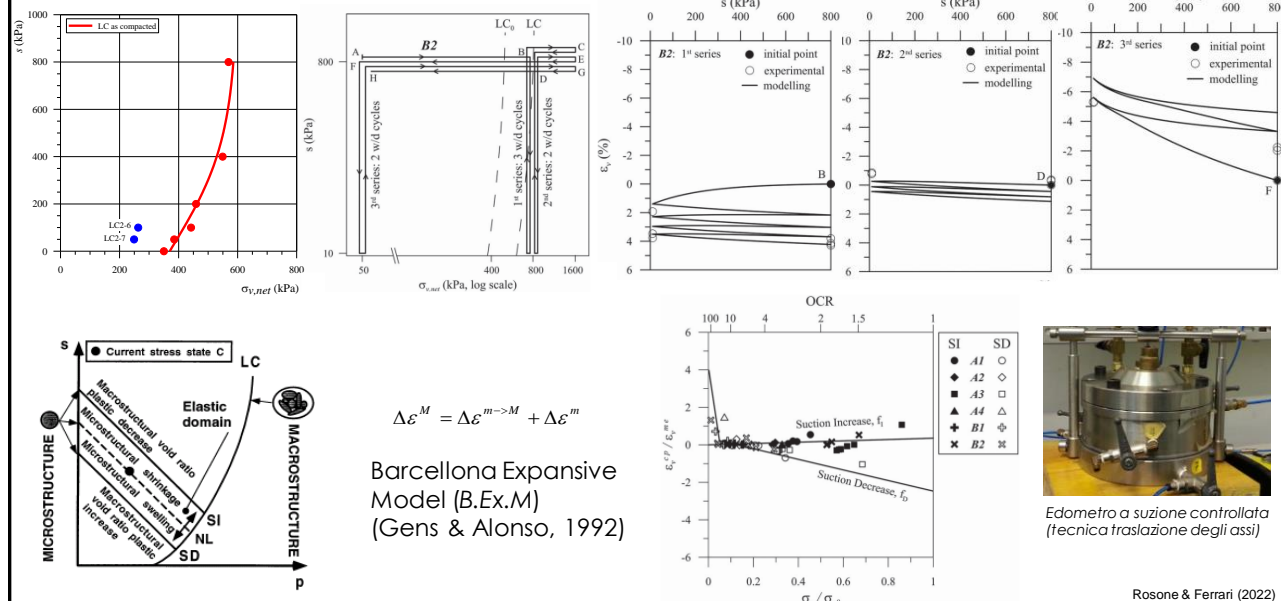


Rosone et al. (2016)

12

Tattamento dei terreni argillosi

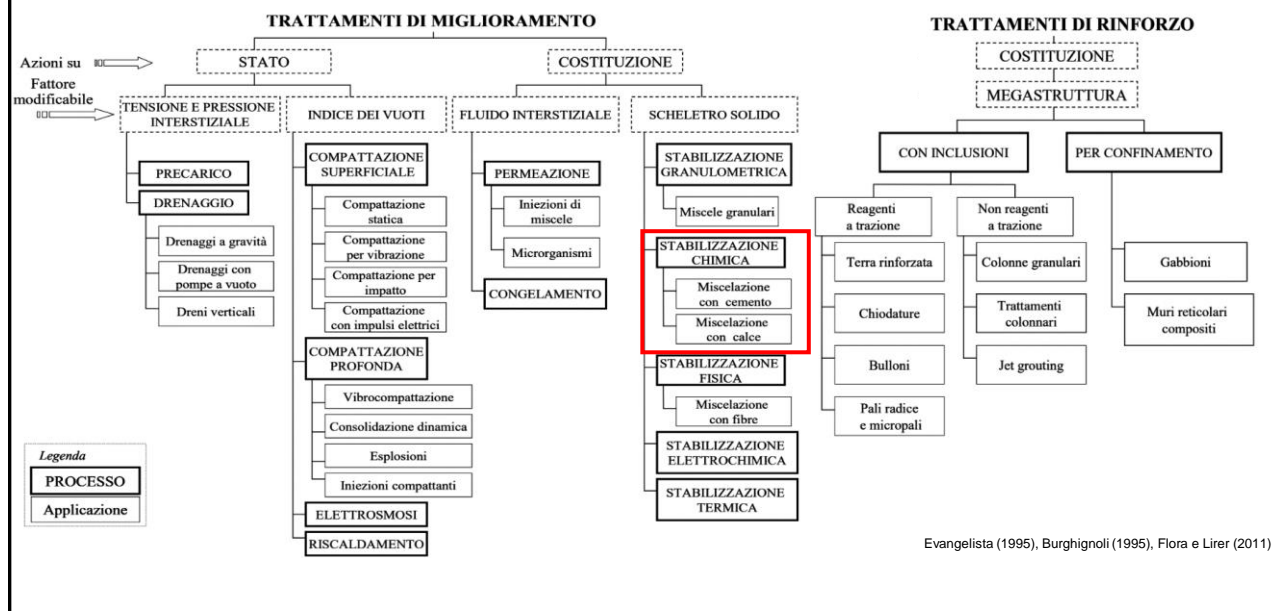
Risposta ai cicli di wetting/drying argille compattate



13

Miglioramento e stabilizzazione dei terreni

Classificazione



Evangelista (1995), Burghignoli (1995), Flora e Lirer (2011)

14

Terreni argillosi tratti con calce

Metodi di produzione e reazione della calce viva (CaO) e idrata ((Ca(OH)₂)



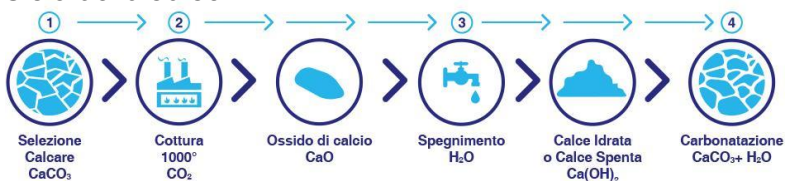
- Estrazione e cottura di calcare (CaCO₃)

$$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2 \quad (\text{calcinazione})$$

$$900 \div 1000^\circ\text{C}$$
- Frantumazione e trasferimento a siti di stoccaggio
- Idratazione (nel caso di Ca (OH)₂)

$$\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca(OH)}_2 + 20 \text{ kcal/mole} \quad (\text{spegnimento})$$

Ciclo della calce



- Indurimento

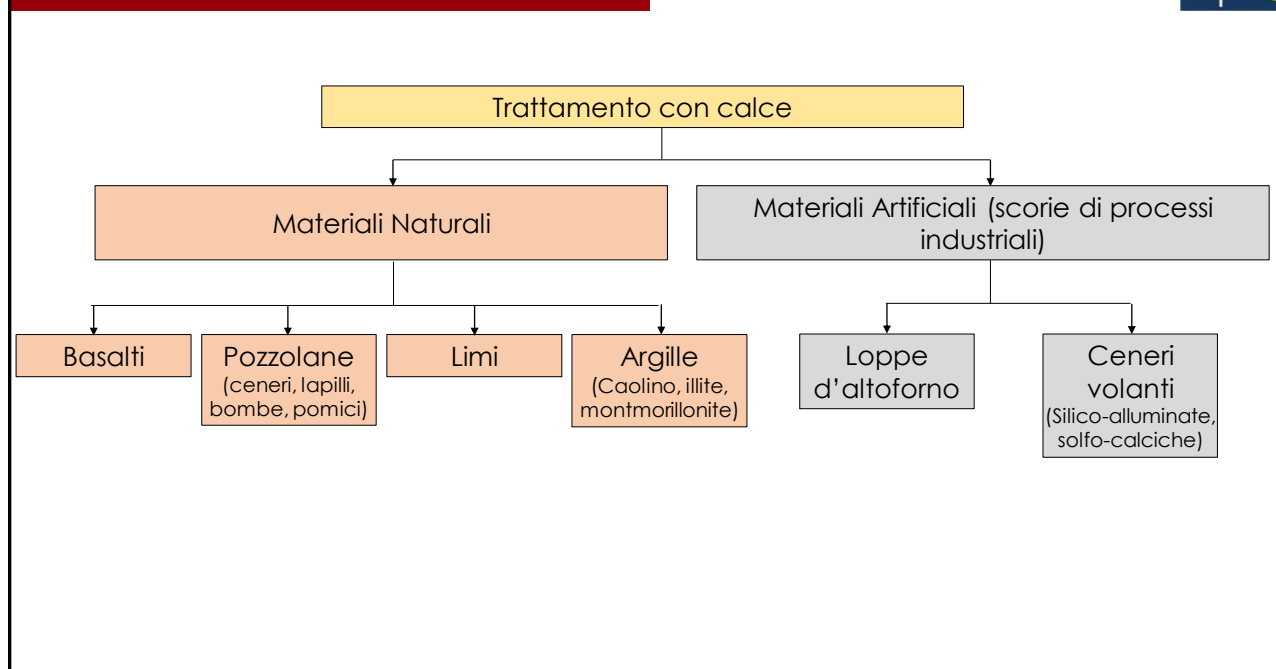
$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O} \quad (\text{carbonatazione})$$

sol. acq.

$$\text{Ca}^{2+} + 2 \text{OH}^- + 2 \text{H}^+ + \text{CO}_3^{2-} \rightarrow \text{CaCO}_3 + 2 \text{H}_2\text{O}$$

15

Materiali trattabili con calce



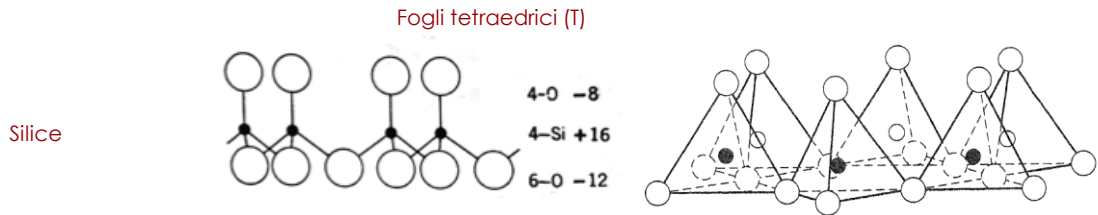
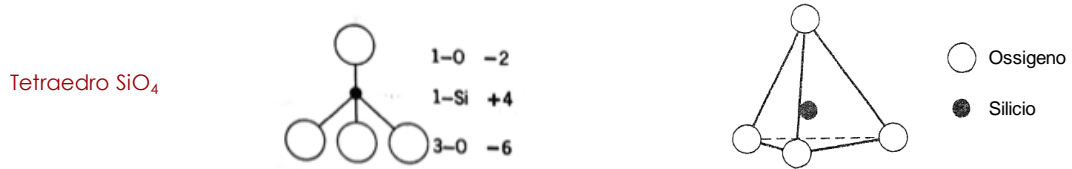
16

Struttura e composizione argille



Materiali fillo-silicatici: $Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot kH_2O$ (silicati di alluminio idrati)

Unità strutturali fondamentali



Modificato da Mitchell & Soga (2005)

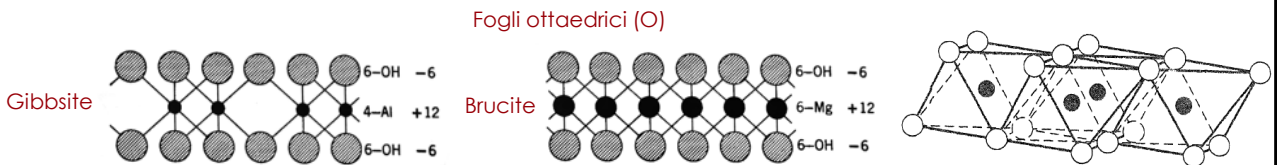
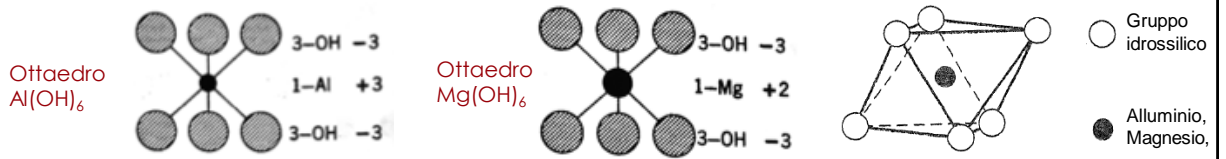
17

Struttura e composizione argille



Materiali fillo-silicatici: $Al_2O_3 \cdot nSiO_2 \cdot kH_2O$ (silicati di alluminio idrati)

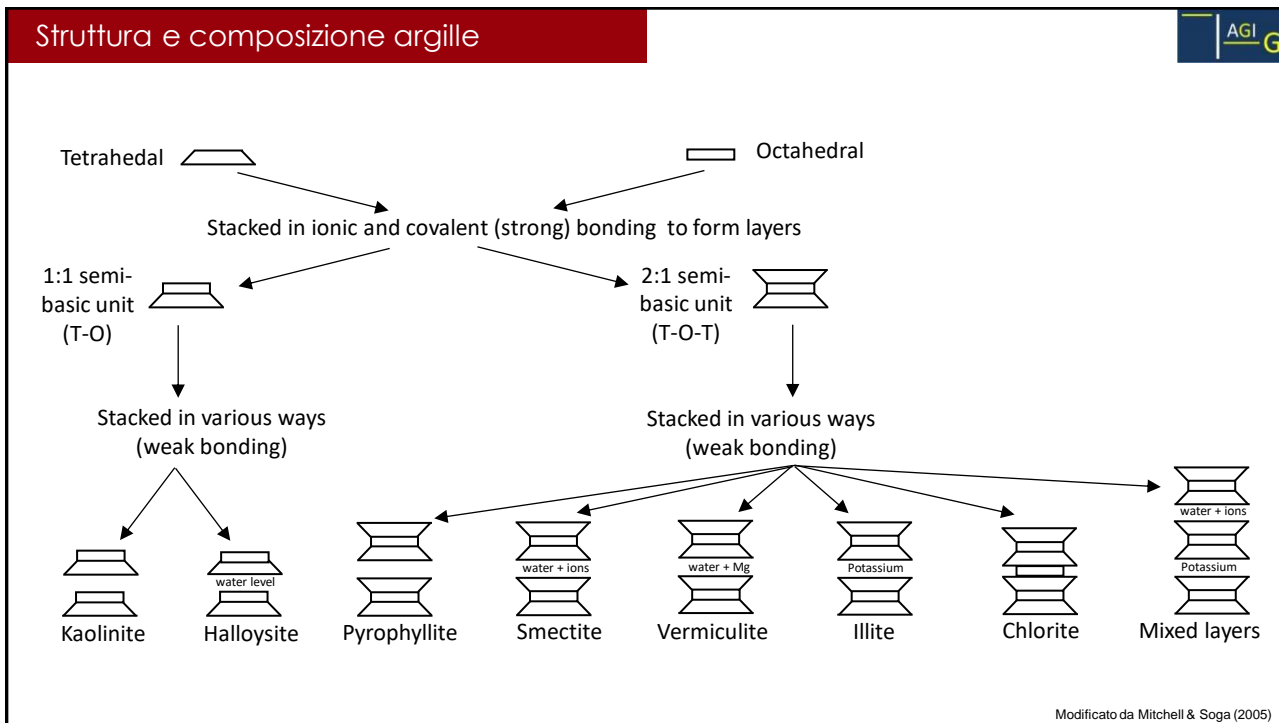
Unità strutturali fondamentali



Modificato da Mitchell & Soga (2005)

18

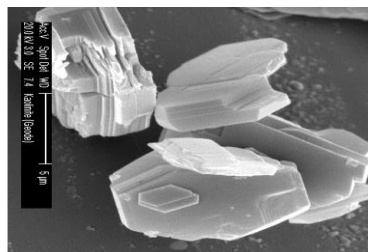
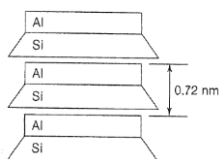
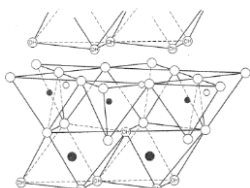
Struttura e composizione argille



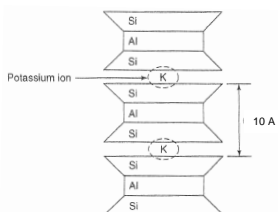
Modificato da Mitchell & Soga (2005)

19

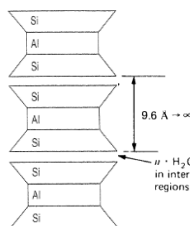
Struttura e composizione argille



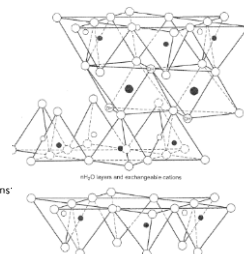
Kaolinite: Fogli T e fogli O collegati tra loro tramite legami idrogeno tra gli atomi di ossigeno (T) ed i gruppi idrossilici (O).



Illite: La presenza di cationi di K rende stabile la distanza tra gli strati T-O-T



Montmorillonite: acqua e ioni scambiabili possono introdursi tra due strati T-O-T adiacenti separandoli



Modificato da Mitchell & Soga (2005)

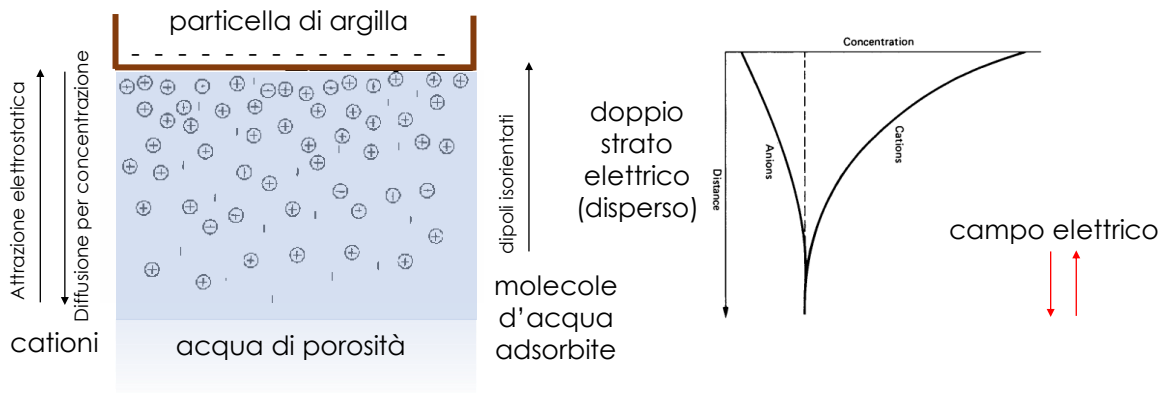
20

Struttura e composizione argille

Sostituzione **isomorfe** di cationi durante formazione o per alterazione del minerale (e.g. Al^{3+} al posto di Si^{4+} , Mg^{2+} al posto di Al^{3+} , Fe^{2+} al posto di Mg^{2+}) causano deficit di carica elettrica.

Attrazione di **cationi scambiabili** tra layer e su bordi delle particelle per annullare la carica delle particelle

Meccanismi associati al sistema acqua-ioni (i.e. particelle argillose immerse in acqua)



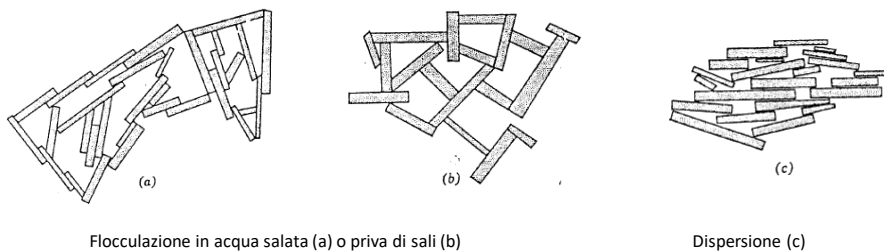
Modificato da Mitchell & Soga (2005)

21

Struttura e composizione argille

L'interazione tra particelle argillose adiacenti immerse in acqua è il risultato di un bilanciamento tra le forze repulsive (dipendenti dalla carica elettrica negativa del doppio strato) e le forze attrattive (Forze di Van der Waals). Tale interazione comporta un diverso assetto delle particelle.

Struttura dei terreni sedimentari



Flocculazione in acqua salata (a) o priva di sali (b)

Dispersione (c)

modificato da Mitchell (1976)

22

Struttura e composizione argille



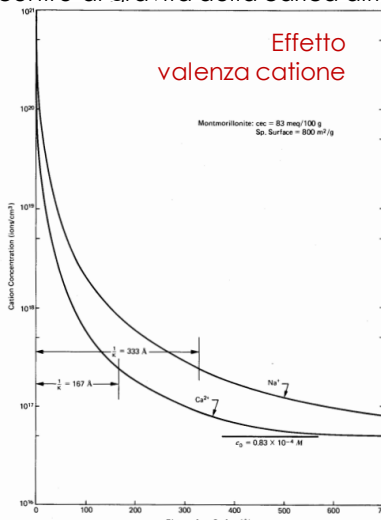
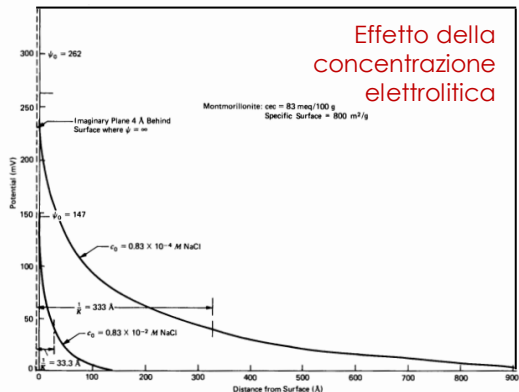
Equazione del doppio strato (Poisson-Boltzman)

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} = K^2 \Psi$$

$$\lambda_K = \left(\frac{DKT}{8\pi n_0 e^2 v^2} \right)^{1/2}$$

Ψ = potenziale elettrico; x = distanza dalla superficie;
 $1/K$ è spessore del doppio strato diffuso
 (centro di aravità della carica diffusa)

$1/K$ dipende da σ carica del doppio strato, Ψ_0 potenziale di superficie, n_0 concentrazione elettrolitica, v valenza del catione, D costante dielettrica del mezzo, T temperatura.

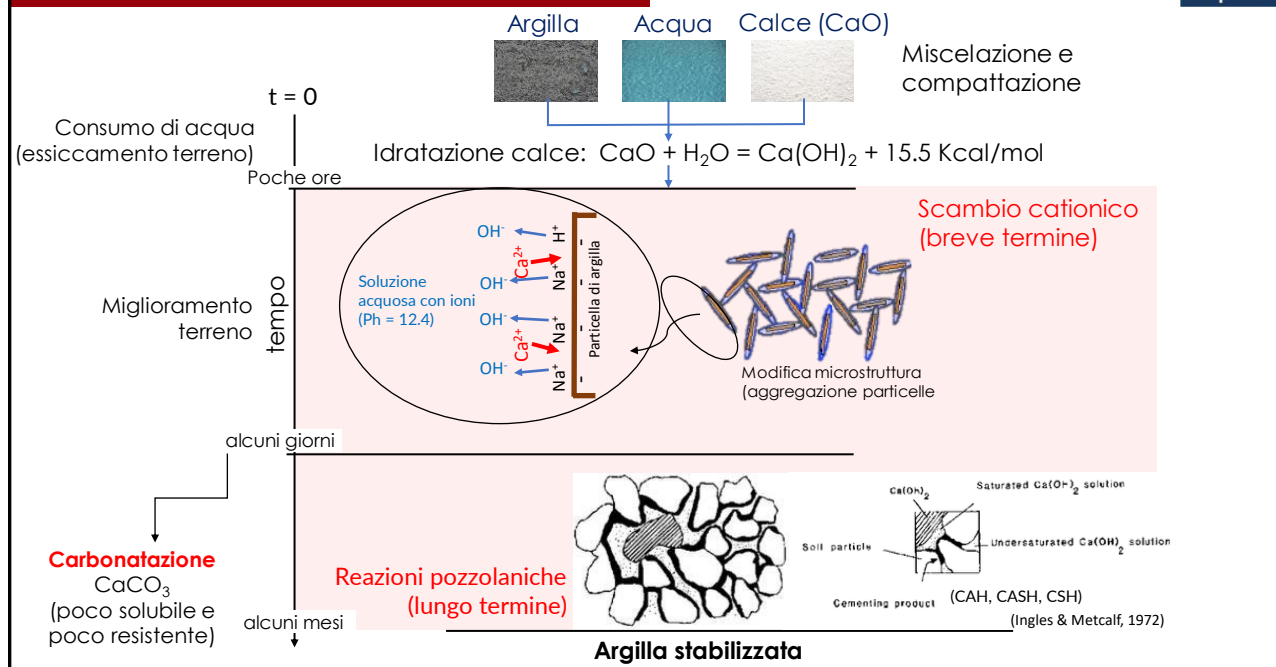


serie litropica:
 $Li^+ < Na^+ < K^+ < Rb^+ < Cs^+ < Mg^{2+} < Ca^{2+} < Sr^{2+} < Ba^{2+} < Al^{3+}$

modificato da Mitchell (1976)

23

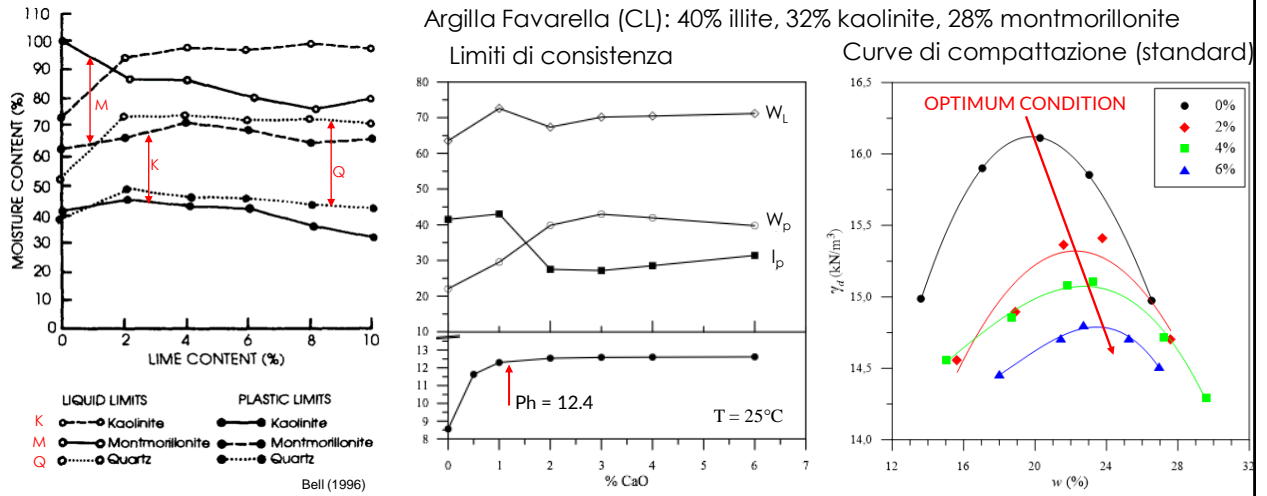
Meccanismo di reazione Argilla - Calce



24

Effetti della reazione Argilla - Calce

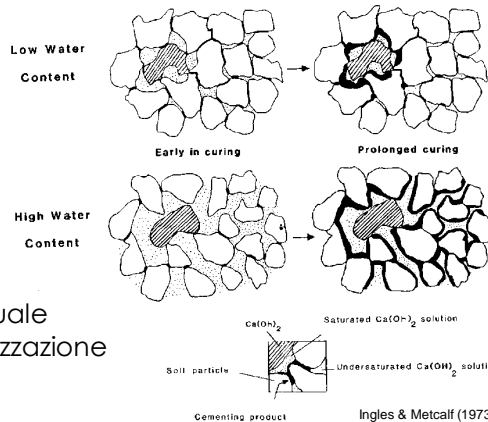
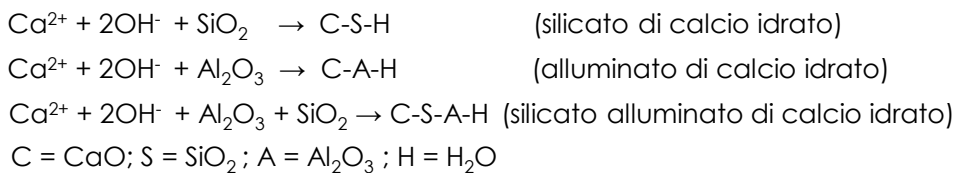
Breve termine (24 ÷ 72 ore)



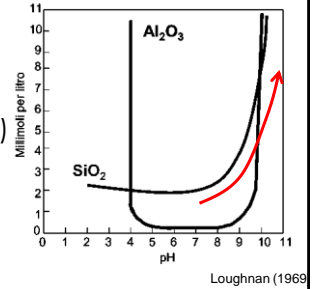
25

Effetti della reazione Argilla - Calce

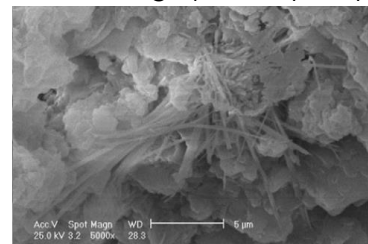
Lungo termine: reazioni pozzolaniche



Solubilità silice e alluminio



High plasticity clay



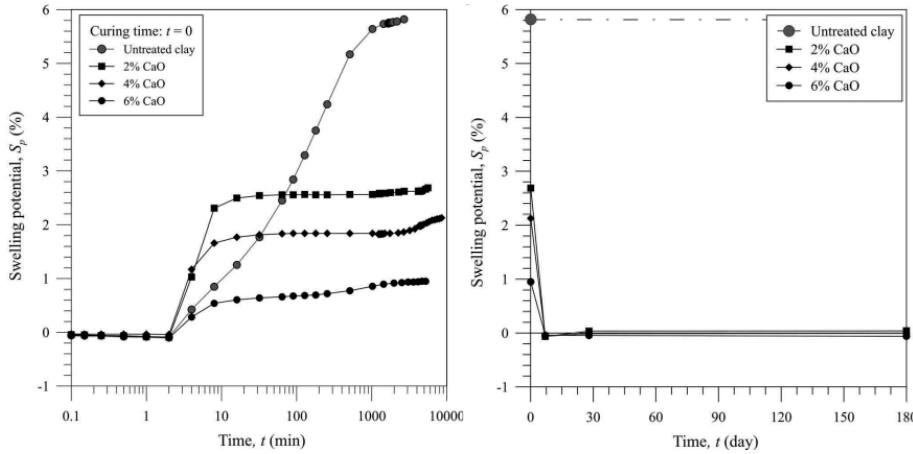
26

Effetti della reazione Argilla - Calce



Lungo termine: comportamento volumetrico durante saturazione

Argilla Favarella (CL)



Annullamento del potenziale di rigonfiamento

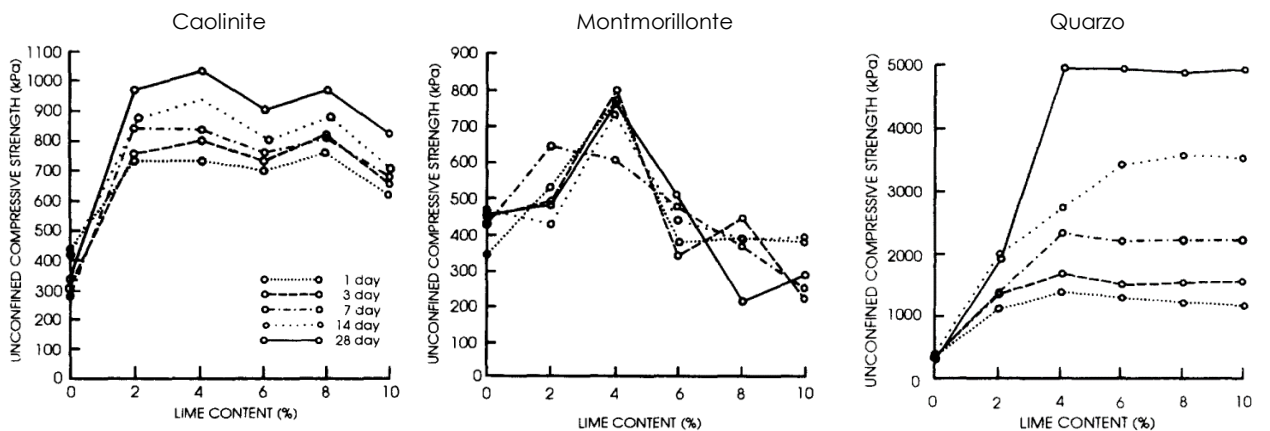
Rosone et al. (2021)

27

Effetti della reazione Argilla - Calce



Lungo termine: effetto della mineralogia sulla resistenza



Bell (1996)

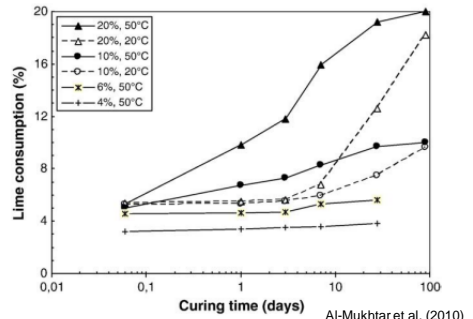
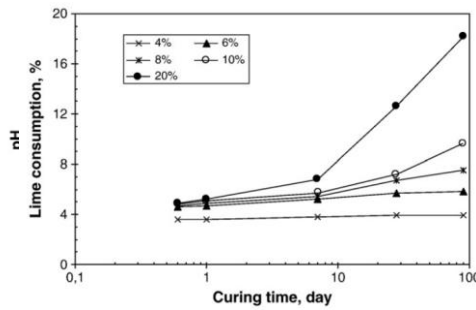
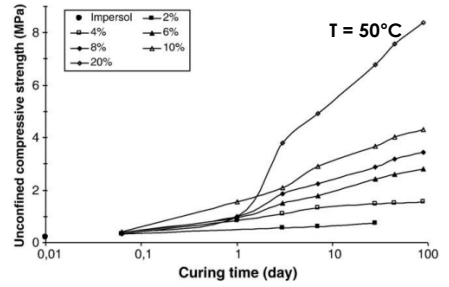
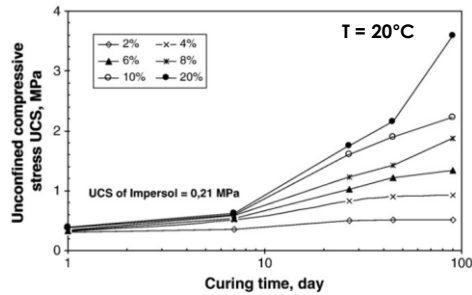
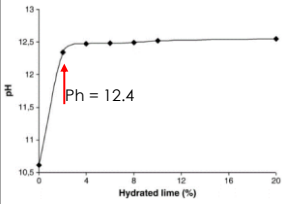
28

Effetti della reazione Argilla - Calce



Lungo termine: effetto del tempo e della temperatura sulla resistenza

Bentonite (Impersol clay)



Al-Mukhtar et al. (2010)

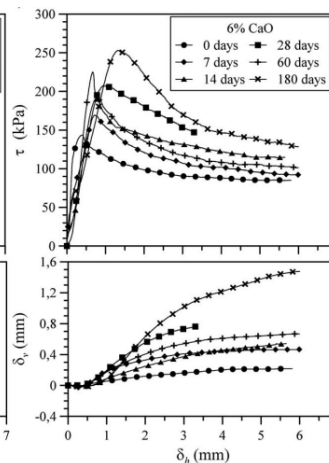
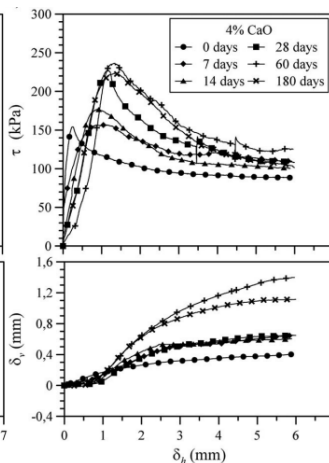
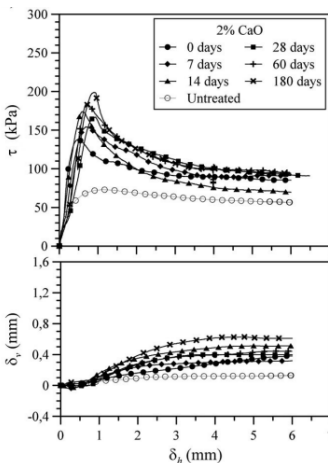
29

Effetti della reazione Argilla - Calce



Lungo termine: effetto sulla resistenza

Argilla Favarella (CL), $\sigma'_v = 100$ kPa



Significativo miglioramento del comportamento meccanico (dilatante)

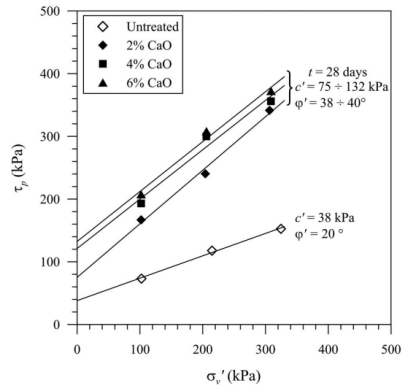
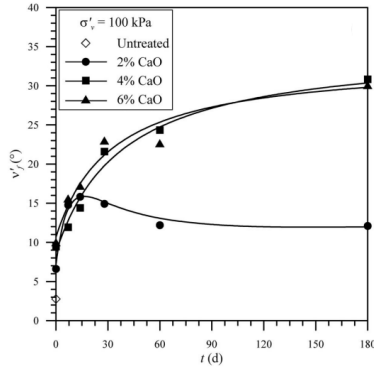
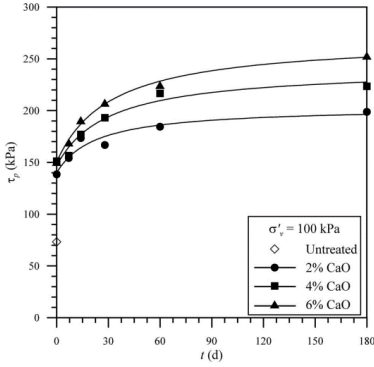
Rosone et al. (2020)

30

Effetti della reazione Argilla - Calce

Lungo termine: effetto sulla resistenza

Argilla Favarella (CL), $\sigma'_{v,0} = 100$ kPa



Significativo incremento della resistenza a taglio e del comportamento dilatante

Significativo incremento dei parametri di resistenza a taglio

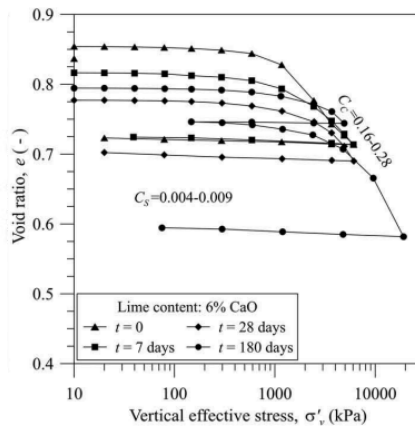
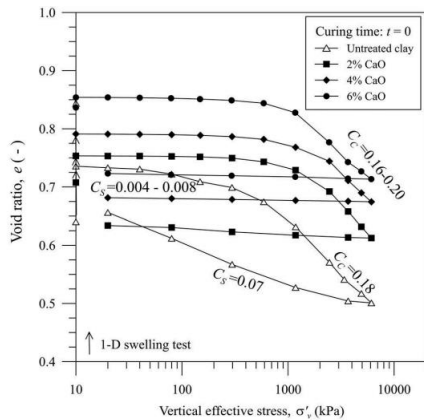
Rosone et al. (2020)

31

Effetti della reazione Argilla - Calce

Lungo termine: comportamento volumetrico sotto carico

Argilla Favarella (CL)



Argilla non trattata:
 $C_c = 0.18$
 $C_s = 0.07$
 $\sigma'_{v,y} = 320$ kPa

Argilla trattata:
 $C_c = 0.16 \div 0.28$
 $C_s = 0.003 \div 0.009$
 $\sigma'_{v,y} = 2500 \div 4500$ kPa

Rosone et al. (2021)

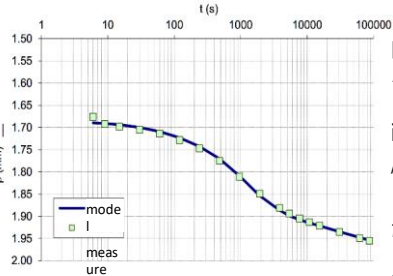
32

Effetti della reazione Argilla - Calce

Lungo termine: comportamento volumetrico sotto carico

Argilla Favarella (CL)

Analisi inversa Prove edometriche



parametri noti:
 $\Delta\sigma_v, H$

incognite:
 $\rho_{or}, E_{ed}, C_v, C_{\alpha}$

$$t_{95} = T_{95} \cdot H^2 / C_v$$

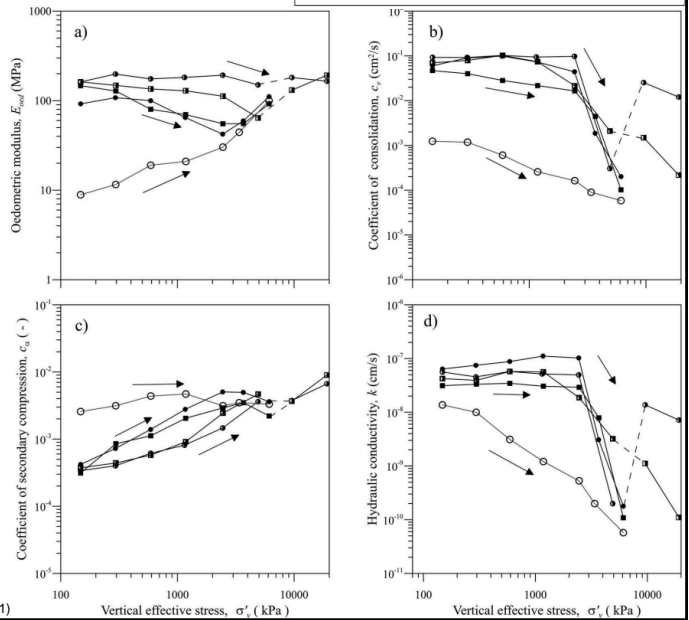
dove $T_{95} = 1.129$

$$\rho(t) = \rho_0 + \frac{2\Delta\sigma_v H}{E'_{oed}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 \frac{2t}{H^2}} \right) \quad \text{se } t < t_{95}$$

$$\rho(t) = \rho_0 + \frac{2\Delta\sigma_v H}{E'_{oed}} \left(1 - \sum_{m=0}^{m=\infty} \frac{2}{M^2} e^{-M^2 \frac{2t}{H^2}} \right) + 2Hc_{\alpha} (\log t - \log t_{95}) \quad \text{se } t \geq t_{95}$$

Rosone et al. (2021)

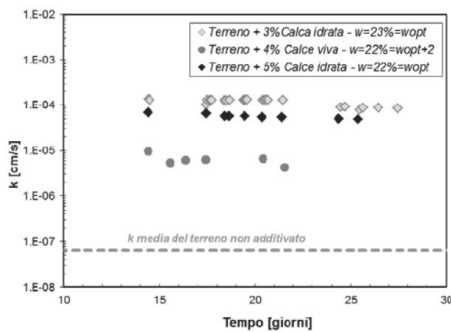
○ Untreated clay ■ 2% CaO; t = 0 ◆ 6% CaO; t = 0
 ■ 2% CaO; t = 180 days ◆ 6% CaO; t = 180 days



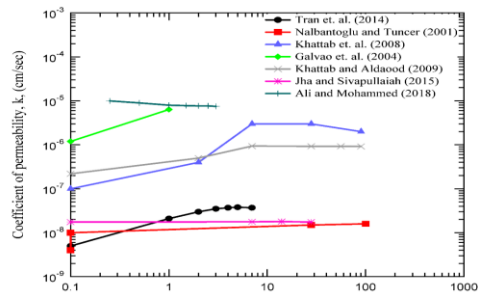
33

Effetti della reazione Argilla - Calce

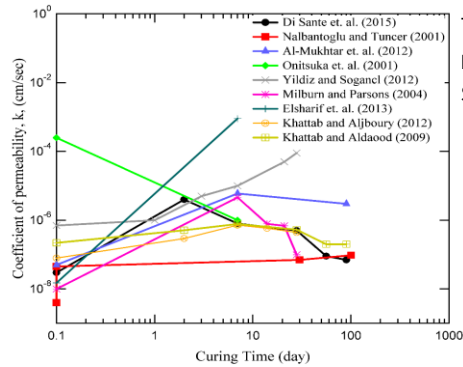
Lungo termine: permeabilità



Di Sante et al. (2015)



Terreni ringonfianti modificati (CaO = CIC)



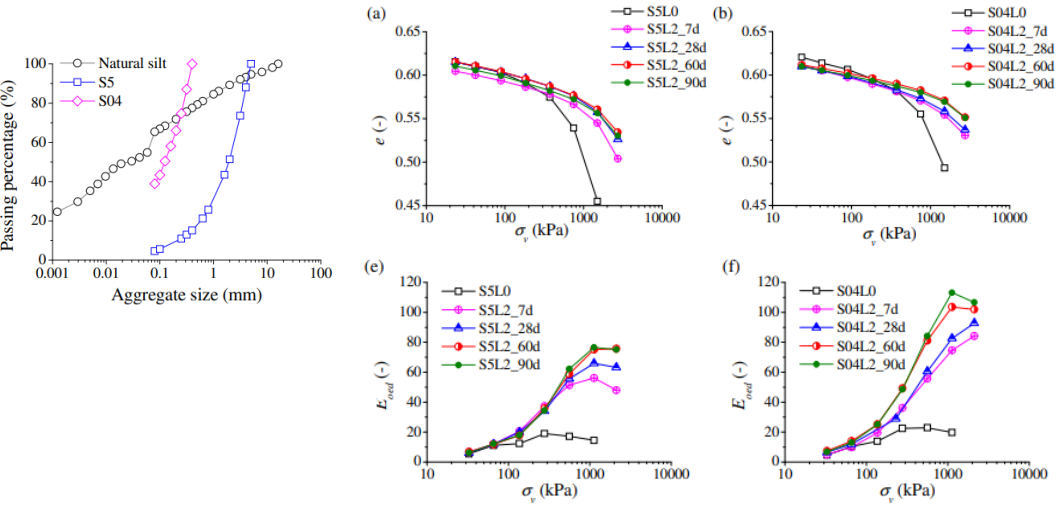
Terreni ringonfianti stabilizzati (CaO > CIC)

Awad et al. (2021)

34

Effetti della reazione Argilla - Calce

Lungo termine: effetto della dimensione degli aggregati



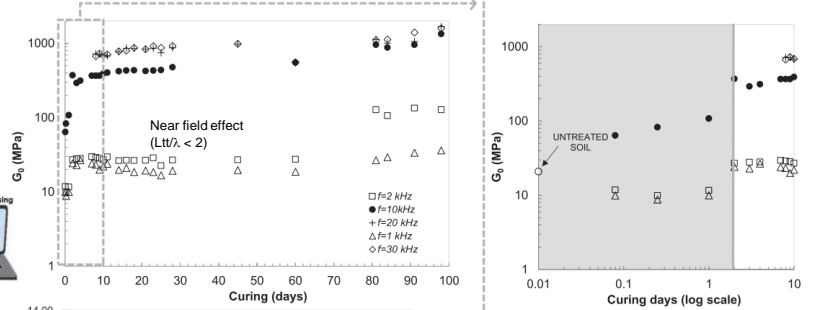
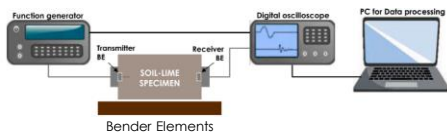
Wang et al. (2017)

35

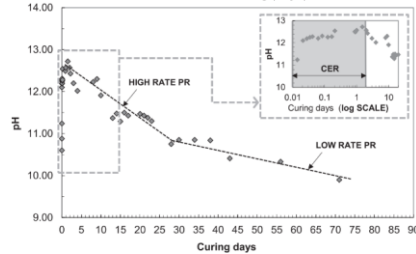
Effetti della reazione Argilla - Calce

Lungo termine: modulo di taglio G_0

Sand (<2mm%)	3
Fine (<0.075 mm,%)	97
Clay (<0.002 mm,%)	52
Specific Gravity (-)	2.65
Liquid limit (%)	57
Plasticity Index (%)	33
ICL - %CaO	1.5



Di Sante et al. (2022)



36

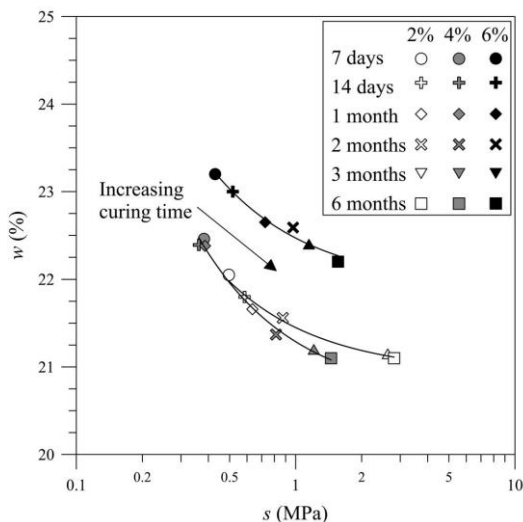
Effetti della reazione Argilla - Calce



Lungo termine: variazione della suzione totale per effetto del trattamento



WP4-T (decagon devices, inc)



Rosone et al. (2018)

37

Effetti della reazione Argilla - Calce



Tecnologia avanzata che promuove il riutilizzo sostenibile di risorse naturali

Miglioramenti noti:

Benefici fisici:

- Riduzione della plasticità
- Riduzione del contenuto d'acqua
- Modifica della granulometria apparente
- Migliore compattazione e lavorabilità

Benefici meccanici:

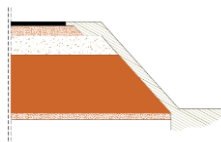
- Incremento resistenza a taglio
- Riduzione rigonfiamento
- Bassa compressibilità
- Incremento modulo resiliente

Benefici ambientali ed economici:

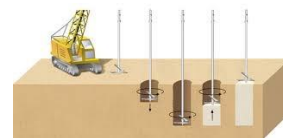
- Minimizzazione uso risorse non rinnovabili
- Minimizzazione trasposto di terreni di scarto
- Trattamento a basso costo
- Riduzione consumo di energia e emissioni CO₂

Campi di applicazione:

- Sottofondi stradali
- Rilevati
- Fondazione di rilevati
- Argini e dighe



- Deep mixing
- Confinamento di siti contaminati



38

Effetti della reazione Argilla - Calce

Still open questions:

Effetti indotti sulla microstruttura?

Durabilità nel tempo della stabilizzazione?

Esposizione all'atmosfera?

Risposta alla variazione delle condizioni idrauliche al contorno?

Effetto delle variazioni ripetute del grado di saturazione?

39

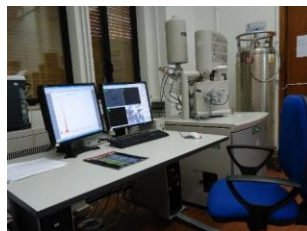
Caratterizzazione microstruttura

Tecnica Sperimentale

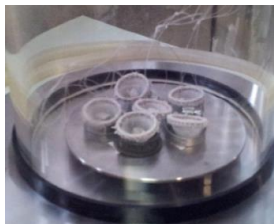
MIP: analisi quantitativa
porosità intrusa e distribuzione dei pori
PASCAL 140-240 series ($p_{max} = 200$ MPa)



SEM: analisi qualitativa forma,
dimensione e distribuzione particelle
FEI Quanta 200f (max 1000000X)

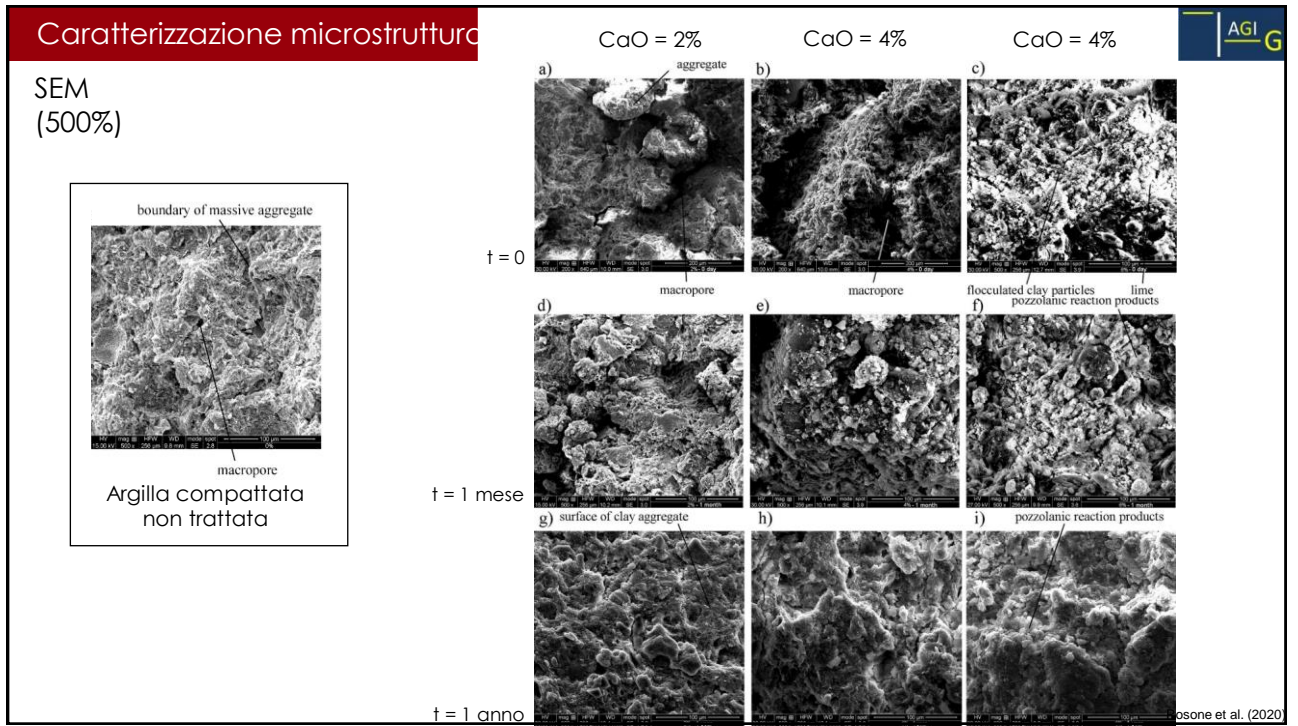


μ -CT: analisi quantitativa forma,
dimensione e distribuzione particelle
Skyscan 1272 BRUKER (max 1000000X)

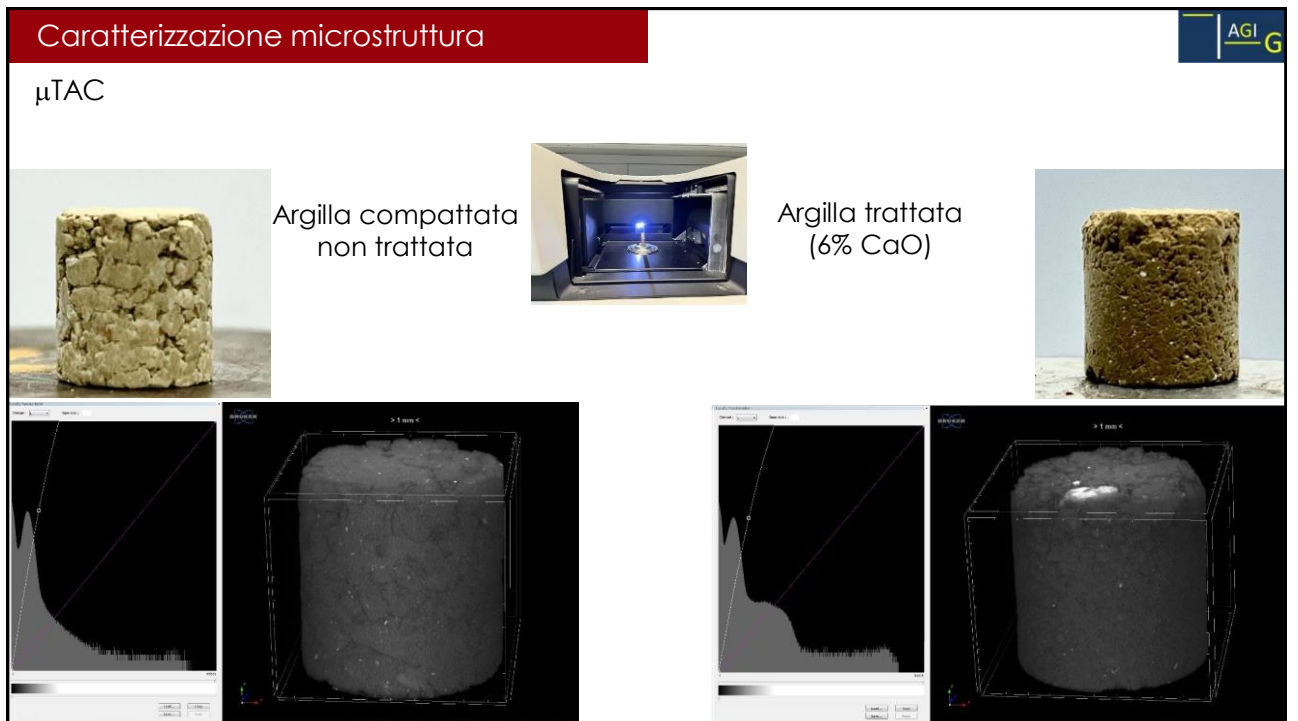


FREEZE-DRYING:
(congelamento per
immersione in azoto liquido e
sublimazione a $T = -60^{\circ}\text{C}$)
Lyophilizer LIO 5P

40



41



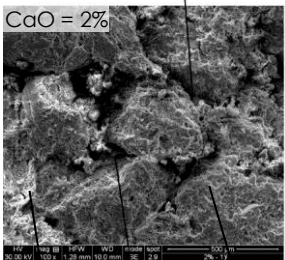
42

Caratterizzazione microstruttura

SEM
(100%)

t = 1 anno

CaO = 2%

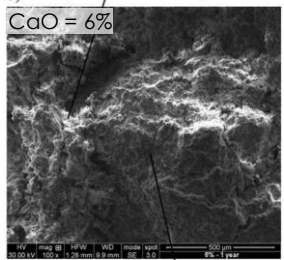


crack

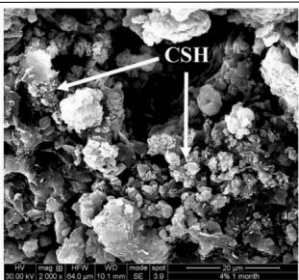
Pozzolanic reaction macropore aggregate

b) CaO = 6%

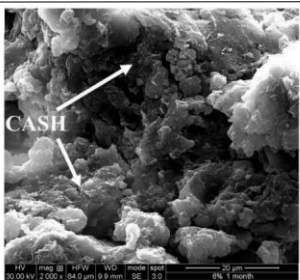
pozzolanic reaction products



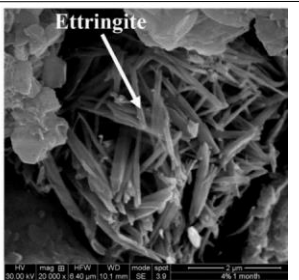
aggregate



CSH



CASH



Ettringite

Rosone et al. (2021)

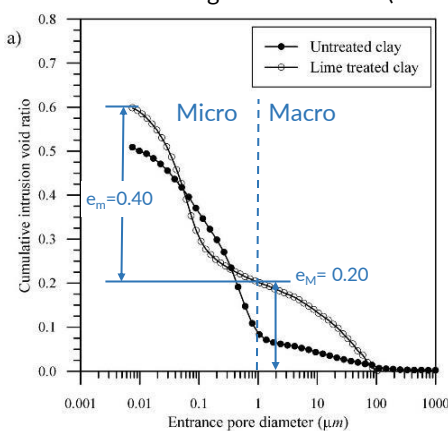
43

Caratterizzazione microstruttura

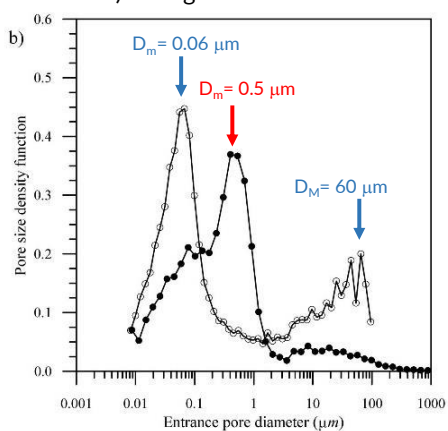
MIP

Argilla non trattata (Proctor standard) vs Argilla trattata

a)



b)



Indice di porosità intruso nei macropori incrementa ma si riduce quello nei micropori

Rosone et al. (2020)

44

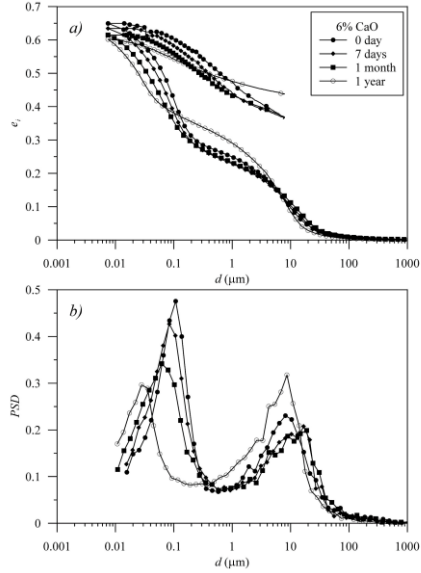
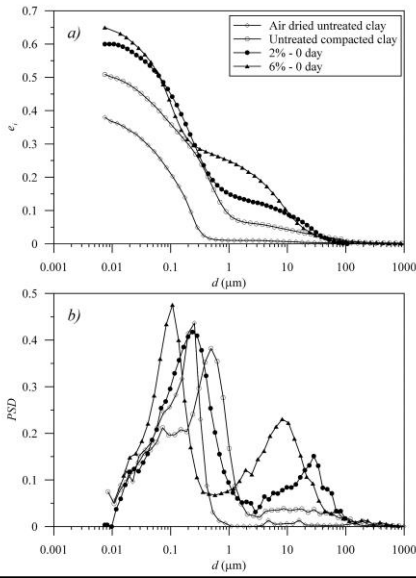
Caratterizzazione microstruttura



MIP

LIME CONTENT EFFECT

CURING TIME EFFECT



Rosone et al. (2020)

45

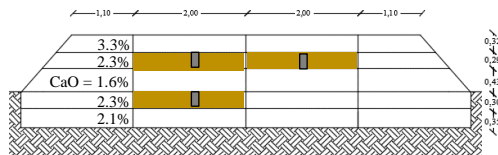
Campo sperimentale



Caratteristiche geometriche:
 $L = 50 \text{ m}$; $B = 8 \text{ m}$;
 $H = 1.05 + 0.75 \text{ m}$ (5 strati)



Sito: S. Cataldo (CL)

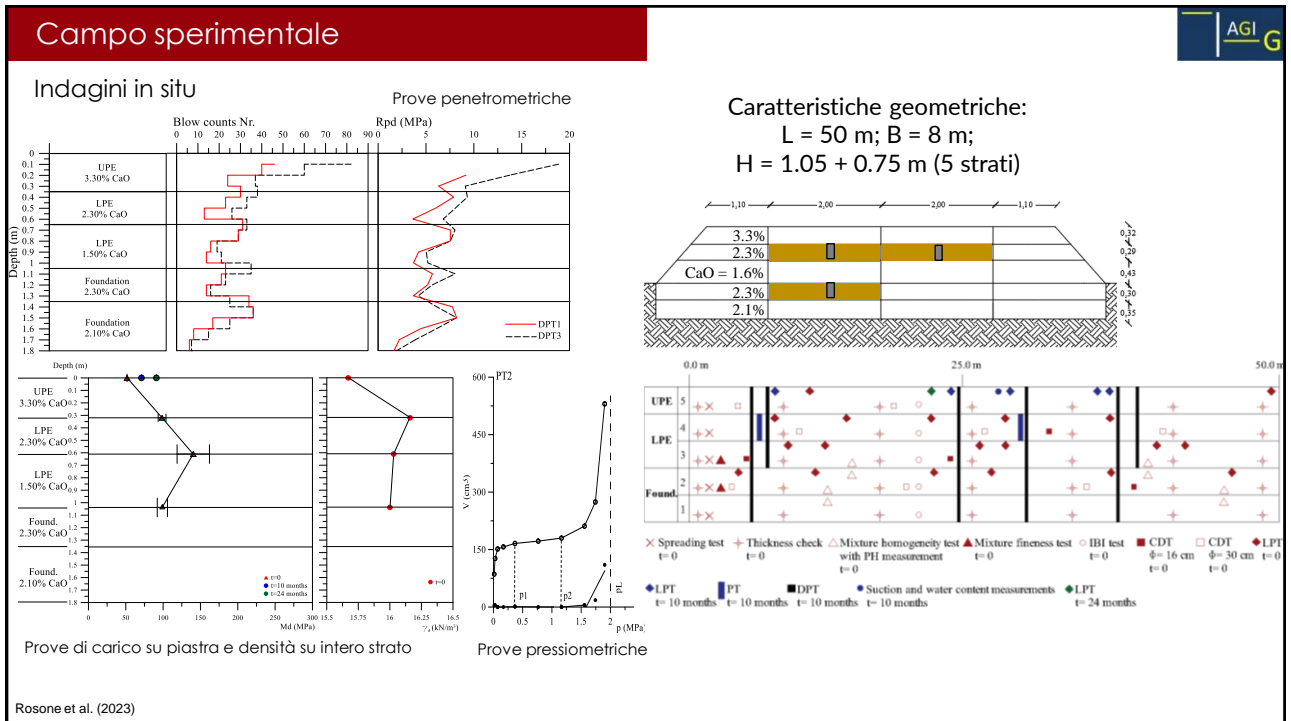


Prove in situ

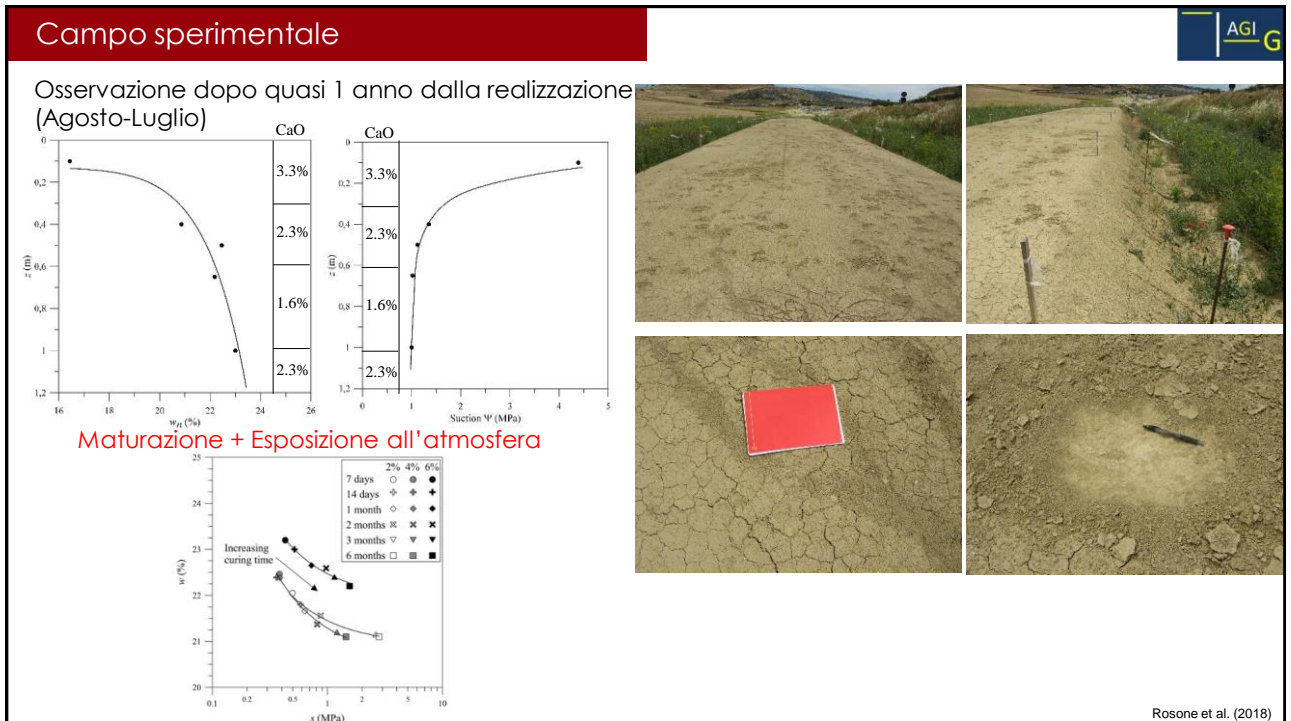
Prelievo di campioni

Campioni prelevati e conservati per 18 mesi ($T = 20^\circ\text{C}$, $RH \geq 90\%$)

46



47



48

Campo sperimentale



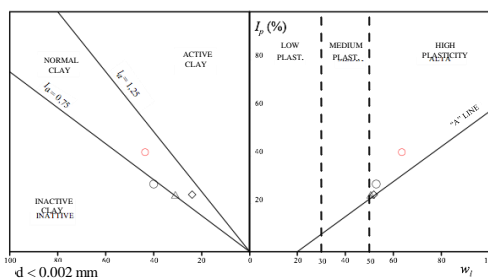
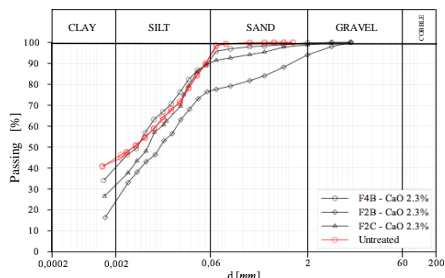
Campione indisturbato



Calce viva CL90-Q (UNI EN 459-1)



Lime content (%)	Dry unit weight (kN/m ³)	Void ratio (-)	Water content (%)	Degree of saturation (-)	Specific weight (kN/m ³)	Passing through sieve d = 0.2 mm (%)	Passing through sieve d = 0.075mm (%)	Available lime CaO (%)	Magnesium oxide Content (%)	Water reactivity t ₉₀ (min)
2.3	15.2-17.4	0.52-0.73	17.6-22.0	0.80-0.97	26.3-26.5	99.0	81.3	94.5	1.3	3



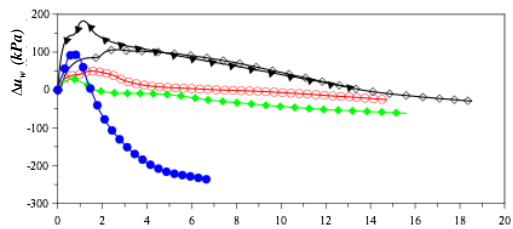
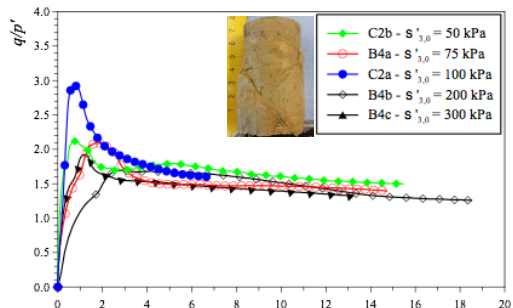
49

Campo sperimentale

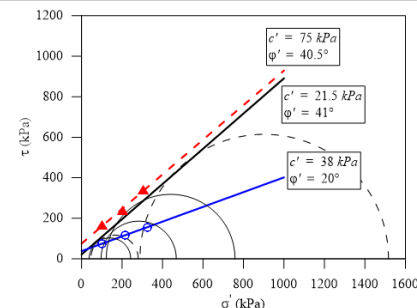


Prove di compressione triassiale CIU

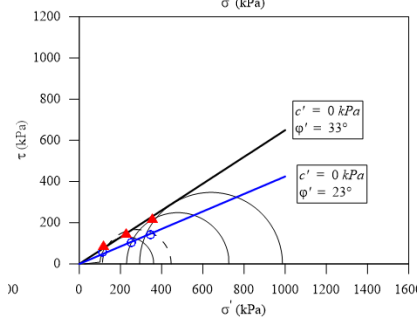
○ Untreated — In situ Treated (triax tests) ▲ In laboratory Treated (direct shear tests)



$A_f = -0.15 \pm 0.02$ for $s'_{3.0} < 100$ kPa
 0.18 ± 0.28 for $s'_{3.0} > 100$ kPa



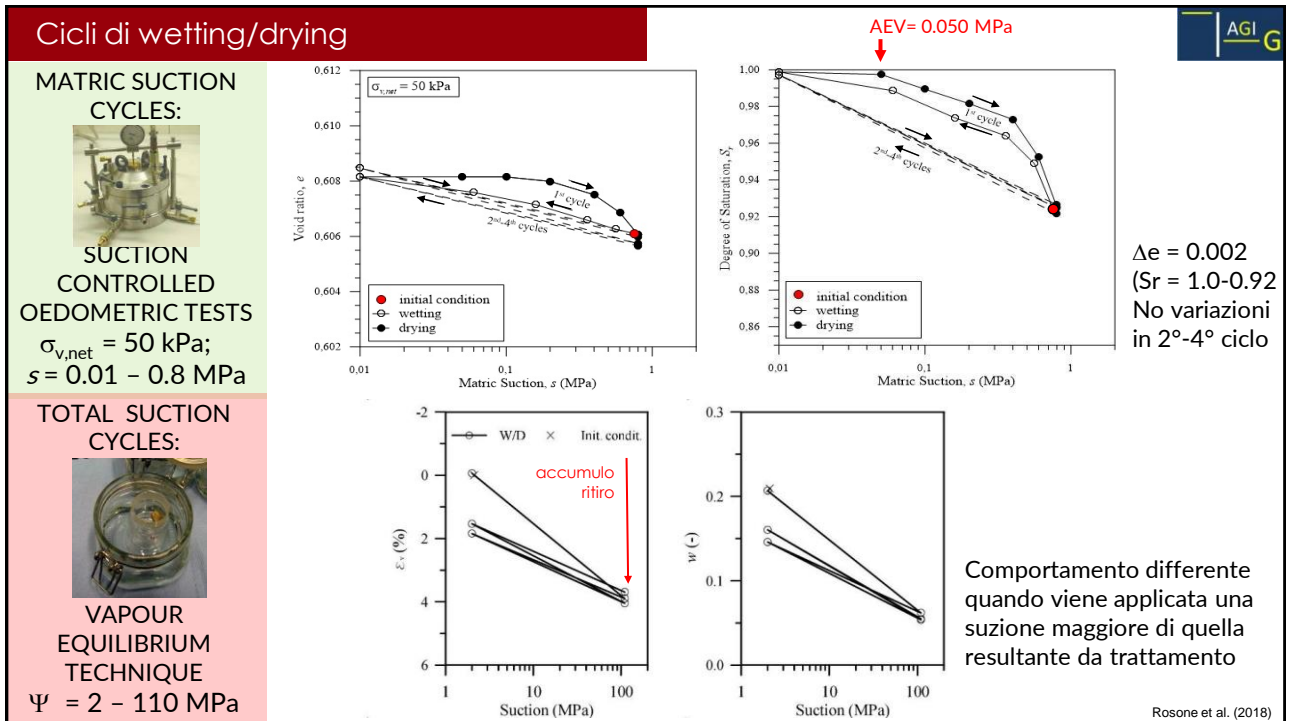
Resistenza di picco



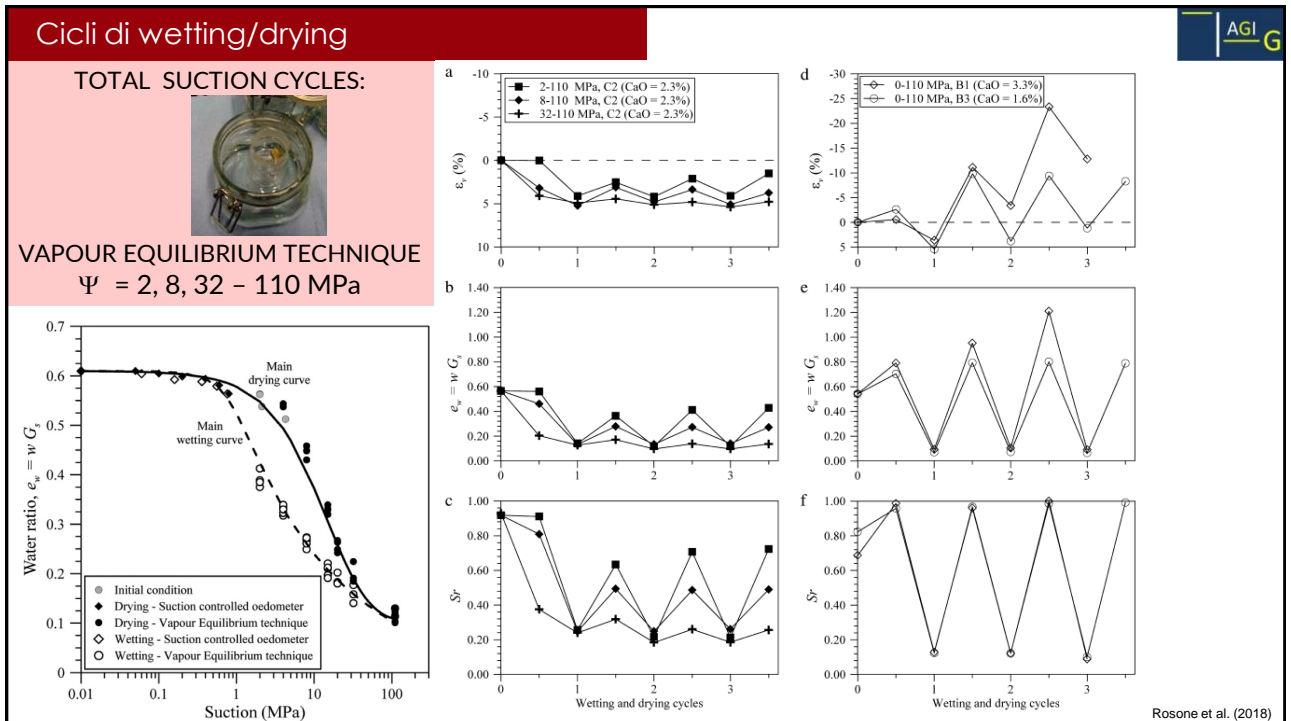
Resistenza ultima

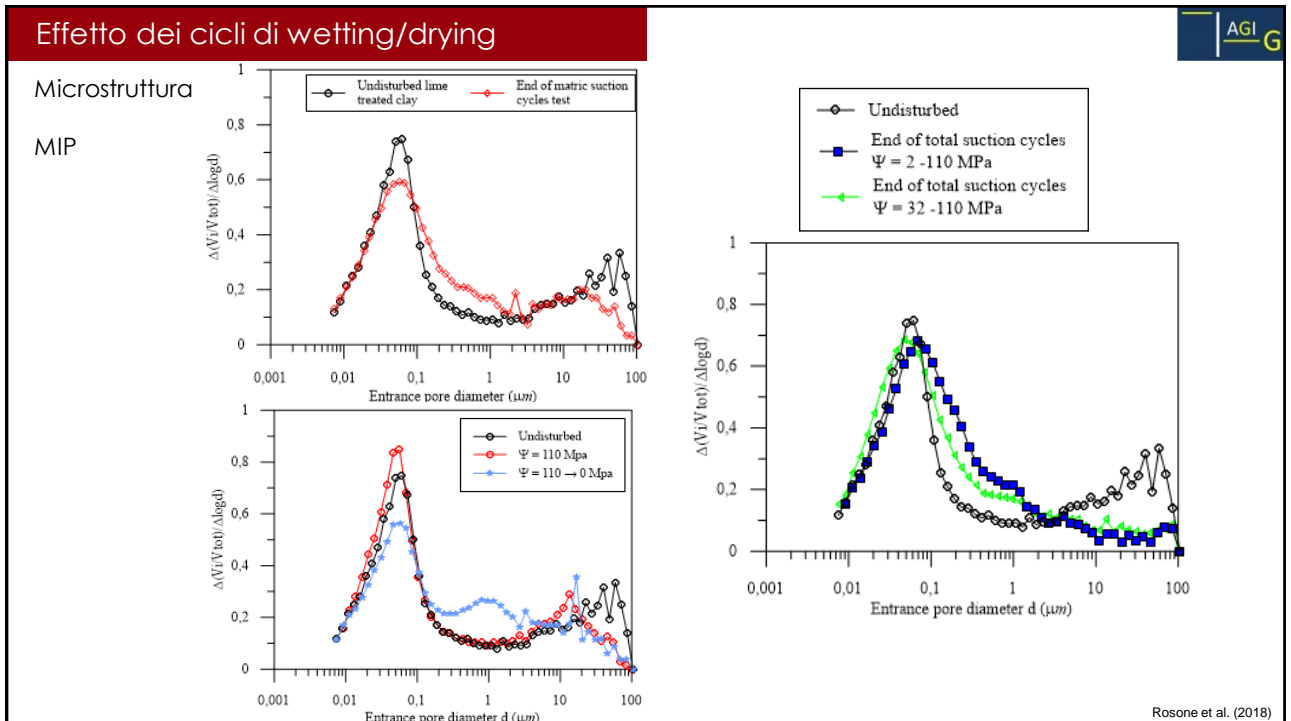
Rosone et al. (2018)

50

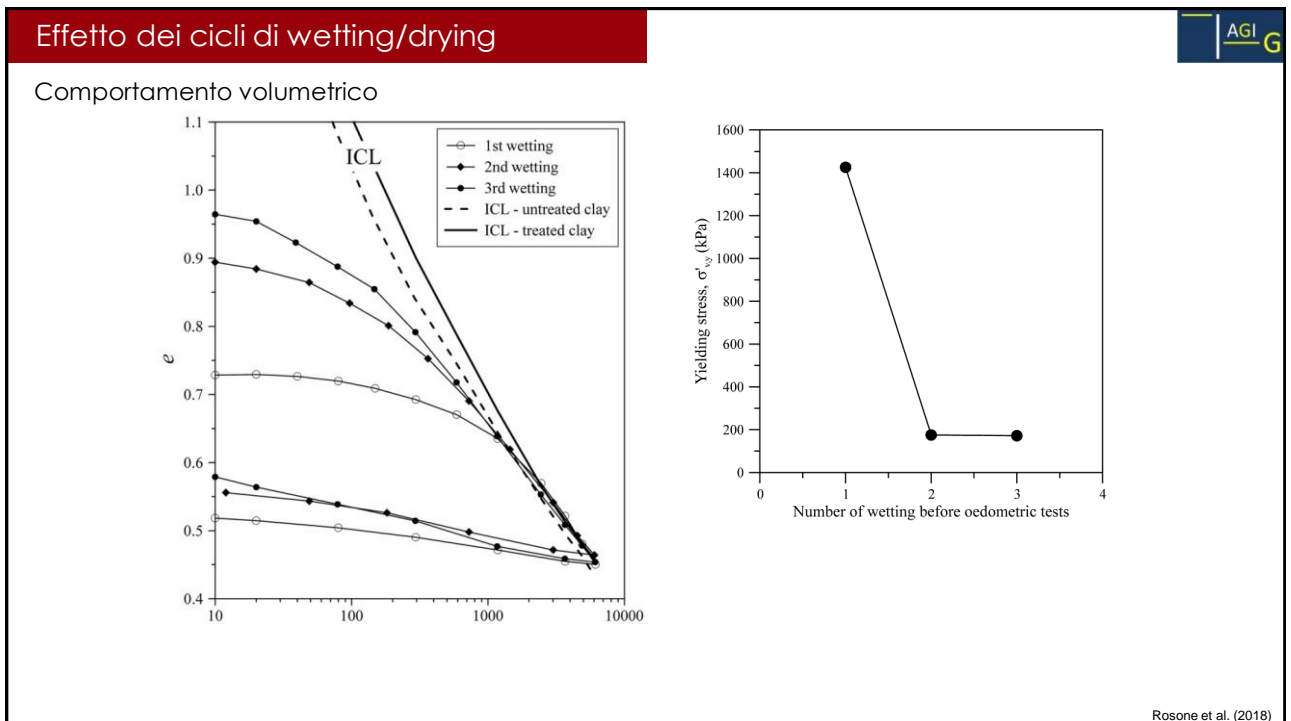


51





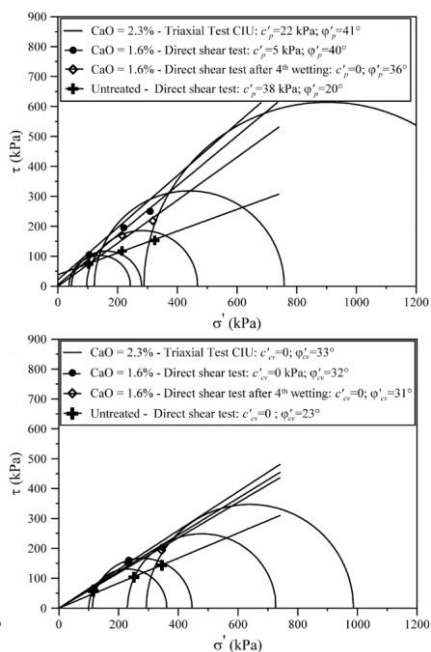
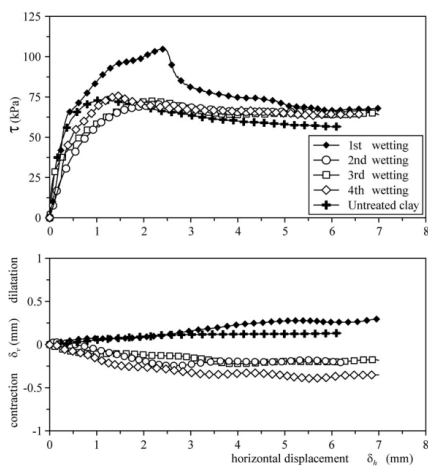
53



54

Effetto dei cicli di wetting/drying

Resistenza a taglio



Resistenza di picco

Resistenza ultima

Rosone et al. (2018)

55

Sustainable binder for clay stabilization

Transizione ecologica

Ricerca di nuovi materiali sostenibili



- Produzione attraverso processi efficienti e con ridotte emissioni inquinanti
- Inesistenza di emissioni nocive dopo la messa in opera
- Lunga durata e riciclabilità al momento dello smaltimento


United Nation Sustainable Development Goals:



Goal 9: Industry, Innovation, and Infrastructure
 Goal 12: Responsible Consumption and Production
 Goal 13: Climate Action

56

Sustainable binder for clay stabilization



Necessità di ridurre le emissioni di CO₂


$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ (calcinazione)
900 ÷ 1000°C

Produzione leganti (cemento e calce) contribuisce al'8% delle emissioni di CO₂

Necessità di passare a opzioni più ecologiche per la stabilizzazione dei terreni

57

Sustainable binder for clay stabilization



STABILIZZAZIONE
sustainable, environmentally friendly and cost-effective

GREEN NEW DEAL

```

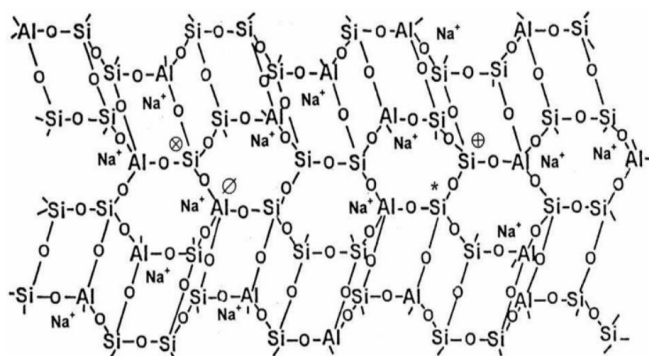
    graph TD
      A[Ricerca di nuovi additivi cementanti sostenibili] --> B[Uso di prodotti di scarto (altrimenti portati a discarica)]
      C[Scarti da processi agricoli] --> B
      D[Scarti da processi industriali] --> B
      B --> E[Geopolimerizzazione]
    
```

58

Geopolimero

Polimero inorganico (Si-O-Al-O) caratterizzato da struttura tridimensionale costituita da lunghe catene di minerali inorganici saldati tra loro mediante forti legami ionici.

Si forma da sostanze ricche di allumina (Al_2O_3) e silice (SiO_2) che si dissociano in soluzione acquose ricche di ioni sodio o potassio (NaOH o KOH)



Tetraedi di AlO_4 e SiO_4 si allineano (condividendo atomi di ossigeno)

59

Sustainable binder for clay stabilization

Geopolimerizzazione vs idratazione del cemento

Parameter	Geopolymer	Ordinary Portland cement
Energy consumption (calcination and crushing)	$990 \times 106 \text{ J/ton}^*$	$3430 \times 106 \text{ J/ton}^{**}$
Carbon emission	Low (169 kg CO_2/m^3) ^{**}	High (306 kg CO_2/m^3) [*]
Environmental impact	Alternative waste management solution	Release of cement kiln dust (CKD)
Major raw material	Industrial and agricultural wastes.	Limestone, shale, rocks etc.
Thermal characteristics	Higher resistance to high temperatures	Lower resistance to high temperatures
Chemical process	Geopolymerisation	Hydration
Calcium requirement	Not necessarily	Required
Resultant cementing compound	Sodium or potassium aluminate-silicate hydrates (Na, K, Li, Ca-A-S-H)	Calcium silicate hydrate (C-S-H) and calcium aluminate hydrate (C-A-H)
Carbonation effects	Results in lowered pH (10–10.5) which still resists corrosion of steel reinforcement ^{**}	Results in lower Ph (7–8) leading to increased rate of corrosion of steel reinforcement ^{**}
Alkali-aggregate reaction (AAR)	No ^{**}	Yes ^{**}

Nergis et al. (2018); Davidovits (2005)

60

Geopolimerizzazione

AGI G

Processo in cui avviene la formazione di un polimero inorganico (Si-O-Al-O) caratterizzato da forti legami ionici

$$M^+_x[-(SiO_2)_y - AlO_2 -]_x \cdot zH_2O$$

M catione alcalino (Na⁺ o K⁺)
 x grado di polimerizzazione
 y rapporto Si/Al
 z moli di acqua necessarie

Attivatore

Alkali reagents
Na, K

NaOH o KOH

Al and Si rich by-products

Water, H₂O

Geopolymer

Precursore

Prodotti di scarto (ceneri volanti, scorie, fanghi), argille (caolino o altro)

Nergis et al. (2018)

La reazione è esotermica e si avvia a rapidamente e a temperature (4 ore il 70% della resistenza finale)

61

Geopolimeri

AGI G

Precursore:

- Caolinite (metacaolino)
- Argille calcinate
- Scarti industriali (slag, ashes, waste glass, aluminium mine tailing, etc.)
- Silico-alluminati naturali (pozzolana, zeolite)

Khatib (2016)

Chemical Compound	OPC	FA-F	FA-C	GGBS	BA	RHA	GP	SF	MP	VA
CaO	62.58	4.24	23.9	36.42	6.13	1.14	8.21	1.35	52.45	19.1
Al ₂ O ₃	5.31	24.4	7.97	10.6	34.3	0.54	1.00	0.39	0.39	13.5
Fe ₂ O ₃	4.04	7.1	5.34	1.28	15	0.16	0.52	1.21	0.78	8.5
SO ₃	2.73	0.29	3.03	0.68	0.9	0.25	0.06	1.00	0.076	0.3
MgO	2.82	2.4	0.53	7.63	1.57	0.5	0.14	2.23	0.54	1.7
SiO ₂	20.25	57.2	18.27	40.4	39.4	87.2	78	92.5	1.29	46.8
K ₂ O	0.92	3.37	1.39	NR	1.19	1.94	0.09	0.08	0.11	4.3

NR—Not reported, OPC—ordinary Portland cement, FA-F—class F pulverised fuel ash, FA-C—class C pulverised fuel ash, RHA—rice husk ash, GGBS—ground granulated blast furnace slag, BA—bottom ash, GP—glass powder, SF—silica fume, MP—marble powder, VA—volcanic ash.

Ghadir et al. (2018); Canakci (2021)

62

Geopolimerizzazione

$M^+_x[-(SiO_2)_y - AlO_2^-]_x \cdot zH_2O$

M catione alcalino (Na⁺ o K⁺)
 x grado di polymerizzazione
y rapporto Si/Al
 z moli di acqua necessarie

Fattori principali che influenzano la resistenza

- Quantità e tipo di precursore
- Quantità, molarità e tipo di liquido alcalino
- Temperatura di maturazione
- Plasticità e capacità scambio cationico argilla

	Poly(sialate) -Si-O-Al-O-	Poly(sialate-siloxo) -Si-O-Al-O-Si-O-	Poly(sialate-disiloxo) -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	Poly(sialate-disiloxo) -Si-O-Al-O-Si-O-Si-O-	Sialate link
	Si:Al = 1	Si:Al = 2	Si:Al = 3	Si:Al = 3	Si:Al > 3
Caratteristiche	adesione ed elasticità				rigidezza e fragilità

63

Argille trattate con Geopolimeri

PFA (Pulvirised Fly Ash) – Ceneri volanti
 Sotto-prodotto combustione di carbone
 polverizzato nelle centrali termoelettriche

(a)

(b)

r (mass ratio) = Sol. Alcalina / binder = 0.5

Fly ash B (FAB)

Constituent	Percentage (%)
SiO ₂	19.8
Al ₂ O ₃	39.4
CaO	5.2
K ₂ O	1.8
Fe ₂ O ₃	7.14

Fly ash R (FAR)

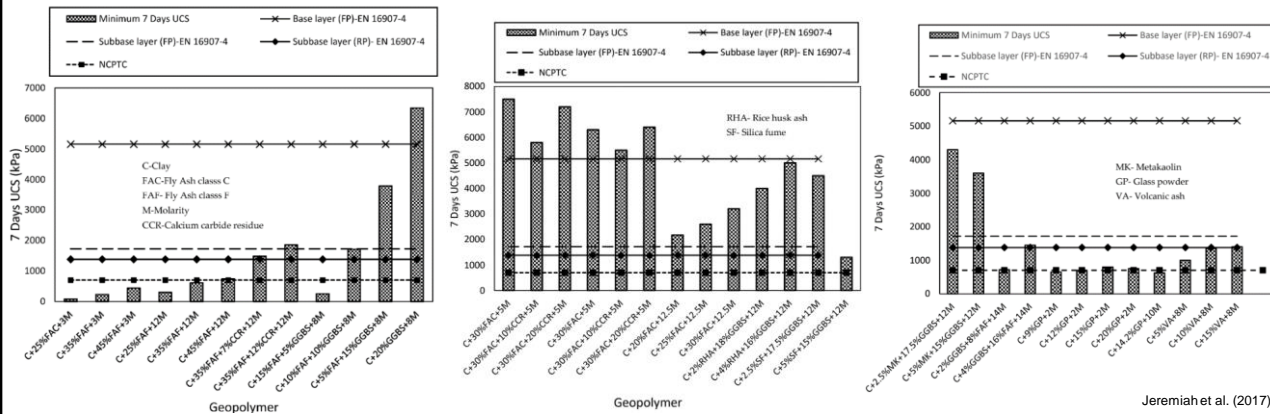
Constituent	Percentage (%)
SiO ₂	48.59
Al ₂ O ₃	21.71
CaO	7.32
K ₂ O	2.11
Fe ₂ O ₃	8.03

Vitale et al. (2017)

64

Argille trattate con Geopolimeri

UCS dopo 7 giorni

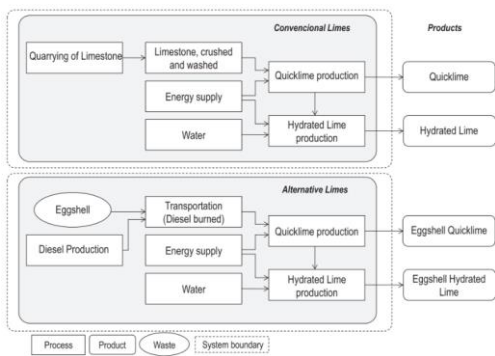


Necessaria una ottimizzazione del legante sulla base delle proprietà specifiche di precursore, attivatore e terreno

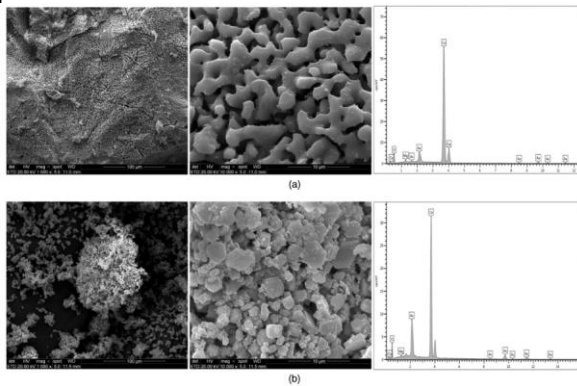
65

Binder innovativi

Gusci di uova (eggshell) calcinati ($T = 1000^{\circ}\text{C}$)



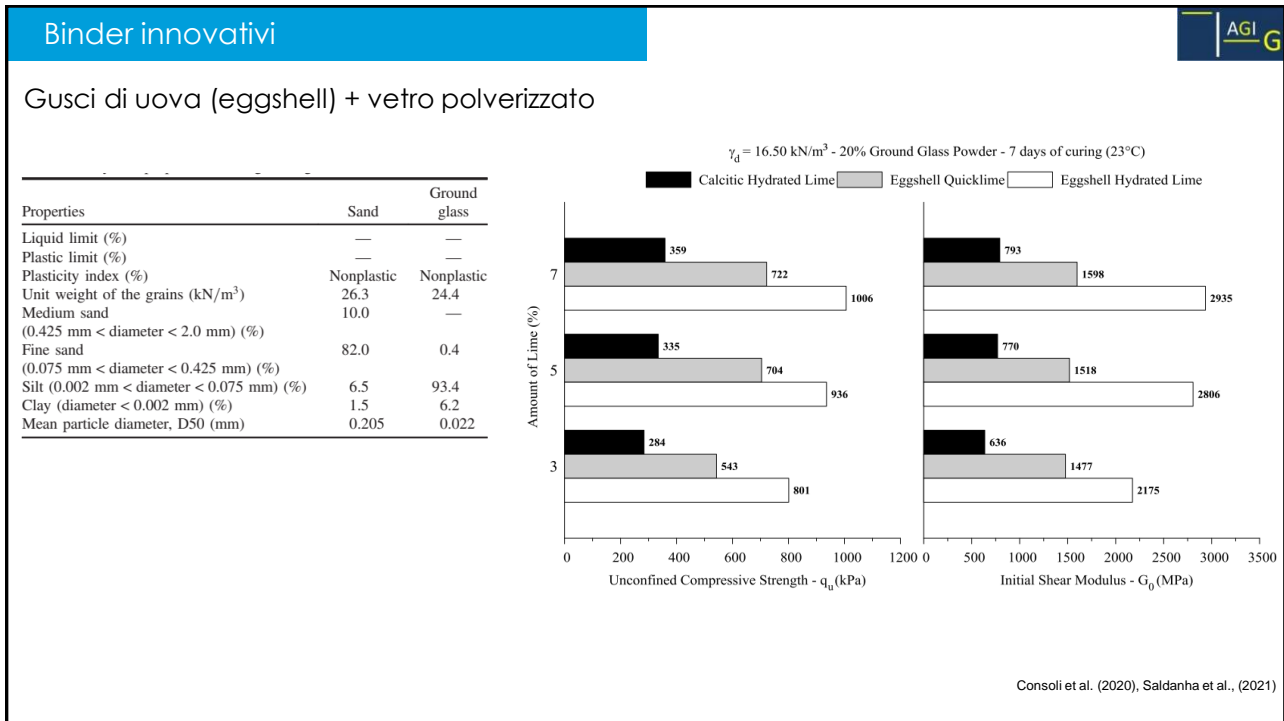
Processo di produzione



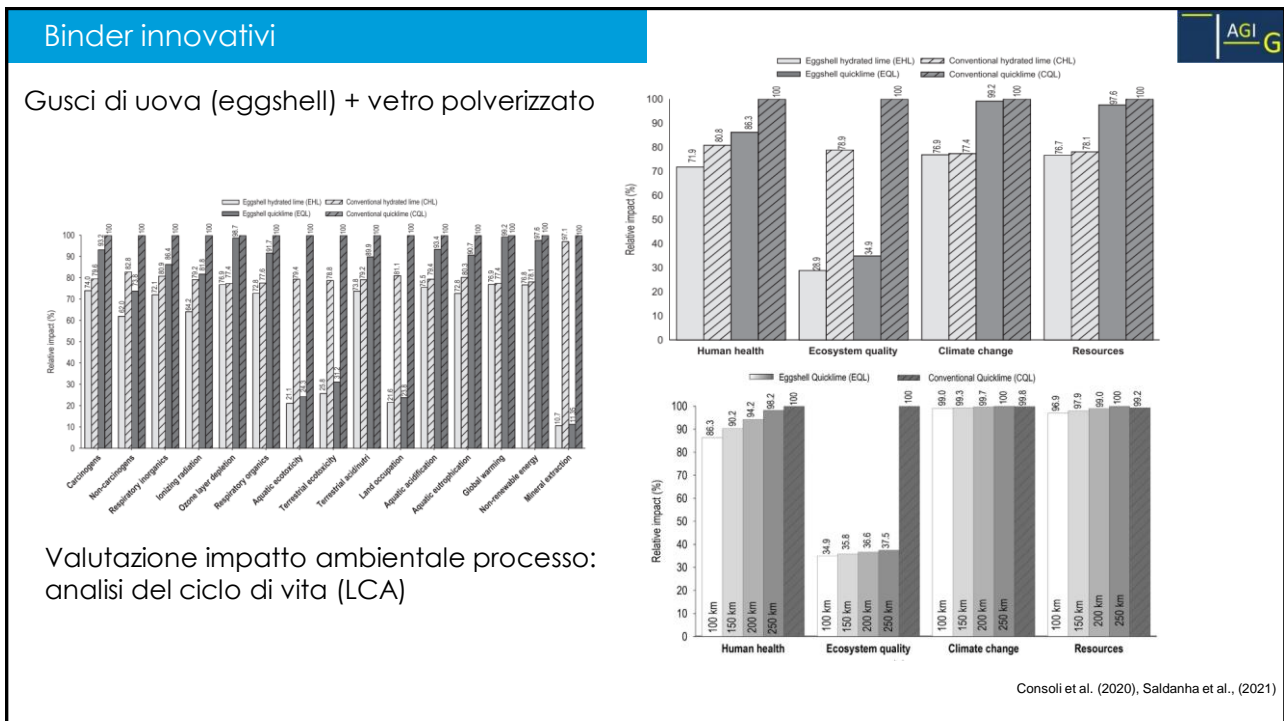
Osservazione SEM e analisi elementare

Consoli et al. (2020), Saldanha et al., (2021)

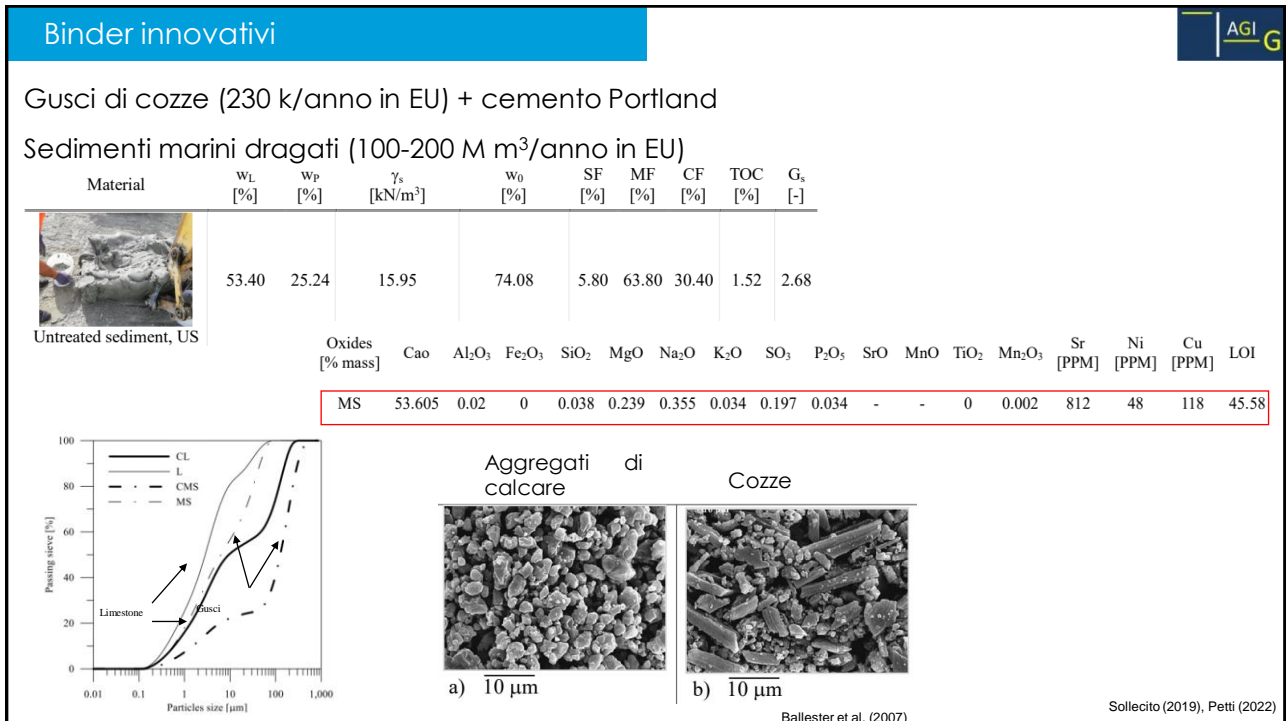
66



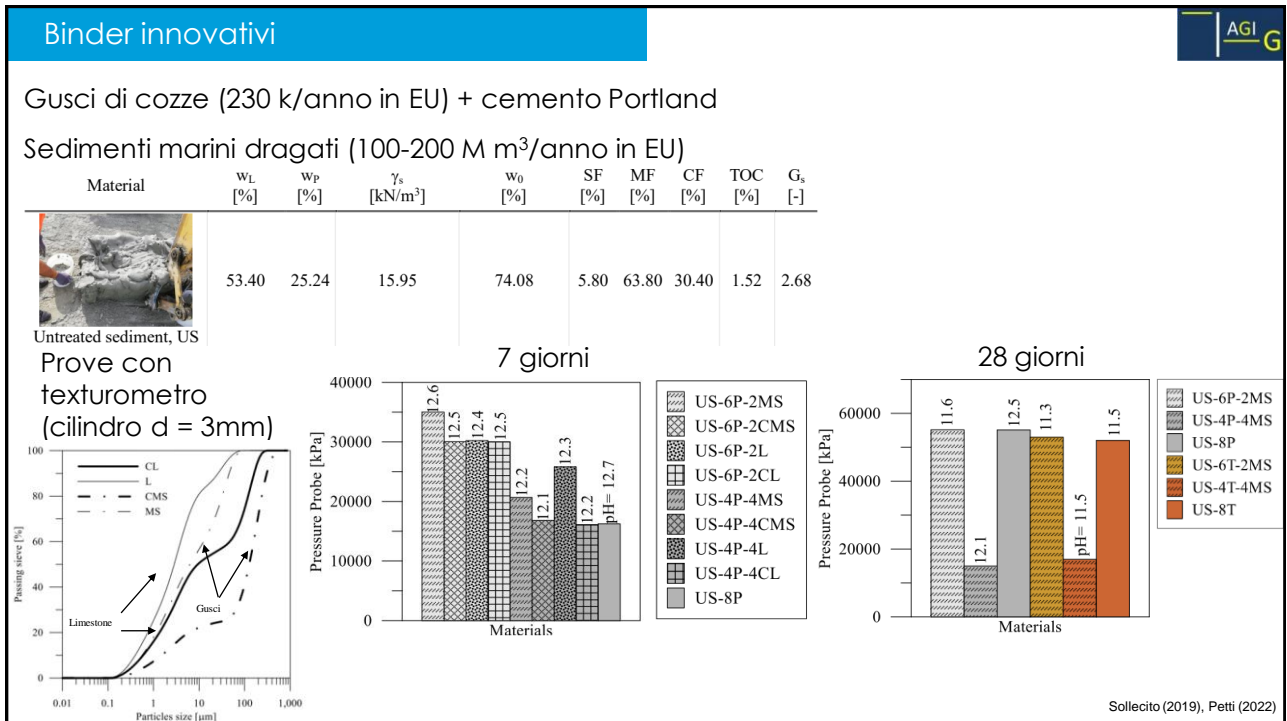
67



68



69



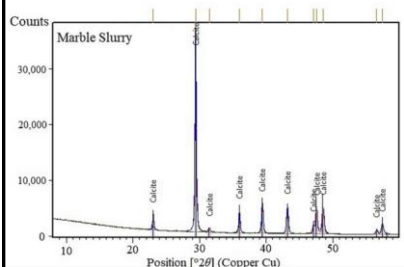
70

Fanghi di segagione

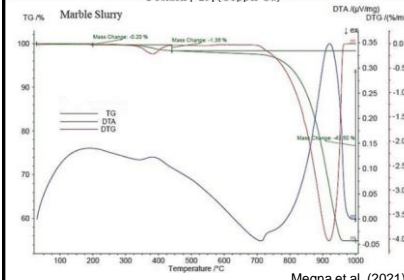


Residuo della operazione di taglio del marmo

RIFIUTO SPECIALE
Produzione: 2 10⁵ ton/anno



XRD



STA

CaCO₃
= 98%



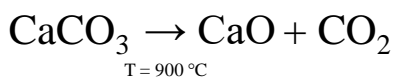
Cave di Custonaci (TP)

71

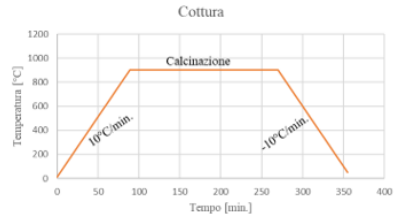
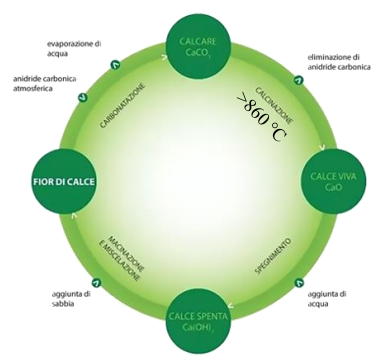
Fanghi di segagione



Residuo della operazione di taglio del marmo



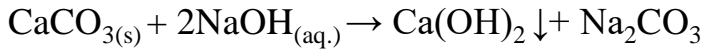
- Essiccamento in stufa a 100 °C per eliminazione acqua (w = 45%)
- Calcinazione in fornace a 900°C per 3 h



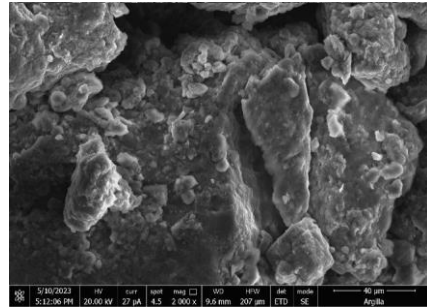
72

Fanghi di segazione

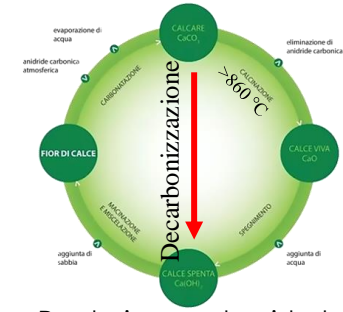
Tramite un processo di decarbonizzazione chimica è possibile ottenere calce spenta $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a pressione e temperatura ambiente, senza generazione di CO_2 .



Hanein et al. (2021)



Produzione calce idrata

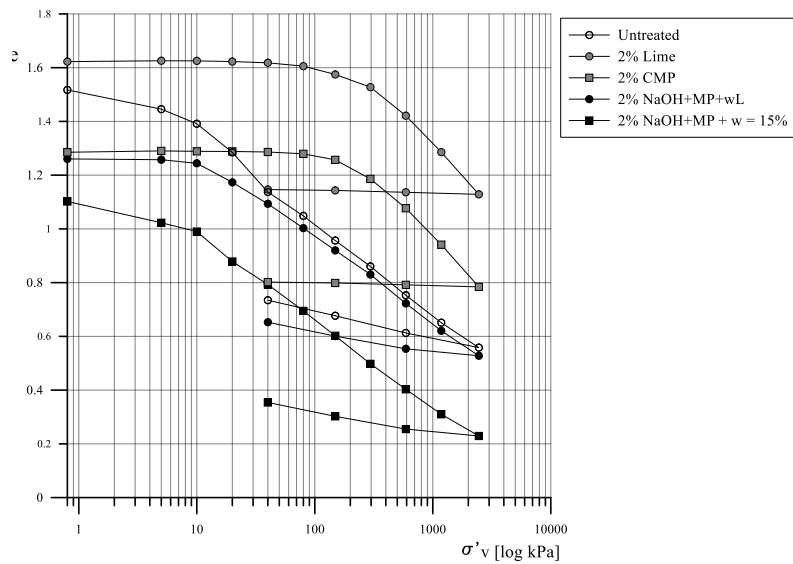


73

Fanghi di segazione



Prove edometriche $t = 0$



74

Campo sperimentale

Necessità di testare in vera grandezza (effetto scala) e in relazione alle azioni ambientali



Già realizzato
Rilevato di prova realizzato con
tecniche tradizionali
(calce viva)

+

Entro pochi mesi
rilevato tradizionale realizzato con
tecniche di trattamento innovative
(polvere di marmo + NaOH)

75

Conclusioni

- La richiesta strutturata di uno sviluppo più sostenibile stimola ulteriormente la comunità geotecnica a cercare nuovi metodi per stabilizzare terreni «problematici»
- Le tecniche tradizionali sono certamente più mature per essere messe in atto e sono in grado di ridurre il «carico sull'ambiente»



76



Quest'opera è distribuita con Licenza
Creative Commons Attribuzione - Non commerciale -
Condividi allo stesso modo 4.0 Internazionale

COMPORAMENTO IDRO-MECCANICO DI TERRENI ARGILLOSI TRATTATI MEDIANTE ADDITIVI TRADIZIONALI E INNOVATIVI

Marco ROSONE, Ph.D.
Università degli Studi di Palermo, Dipartimento di Ingegneria
(marco.rosone@unipa.it)



XII Incontro Annuale dei Giovani Ingegneri Geotecnici
Università degli studi di Padova, Padova
31 Maggio - 1 Giugno 2023

