

TRATTAMENTI CHEMO-MECCANICI DEI SEDIMENTI DI DRAGAGGIO: DALLE TECNICHE TRADIZIONALI AD ALCUNE SOLUZIONI INNOVATIVE

R. Petti, DICATECh, Politecnico di Bari



CONTESTO

LA GEOTECNICA AMBIENTALE

Ramo della geotecnica atta a sviluppare soluzioni tecnologicamente avanzate in grado di fornire adeguati livelli di sicurezza per la tutela della salute umana e dell'ambiente.

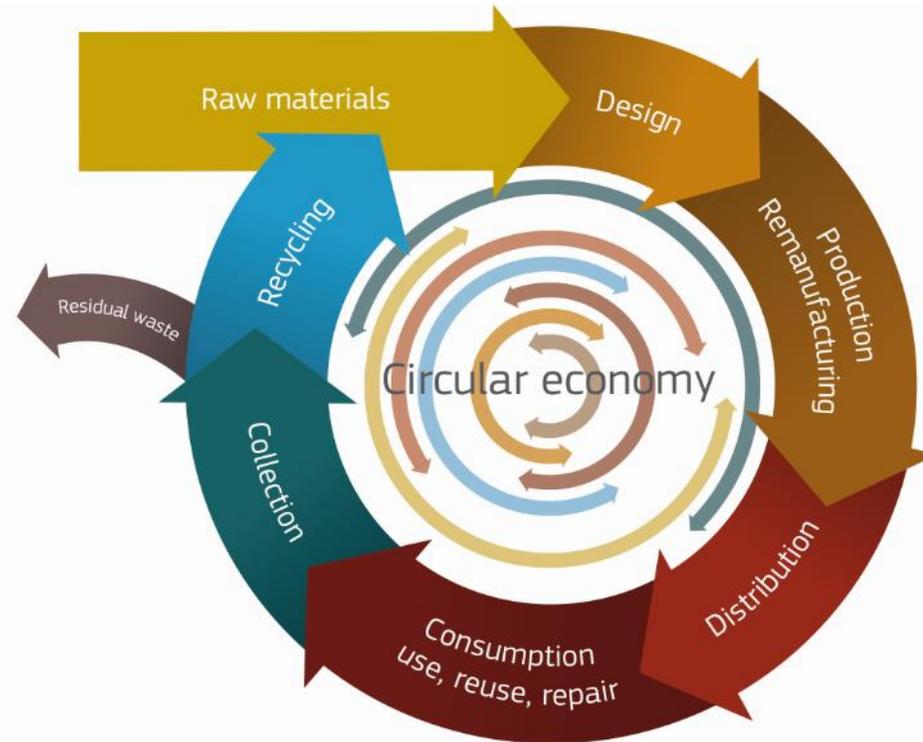
- progettazione degli impianti di smaltimento dei rifiuti (da quelli solidi urbani a quelli radioattivi),
- la progettazione di sistemi di contenimento degli inquinanti nel sottosuolo,
- la predisposizione di procedure per la caratterizzazione idro-meccanica dei rifiuti e di sistemi di monitoraggio per la propagazione degli inquinanti nel sottosuolo,
- lo sfruttamento di risorse minerarie non convenzionali, quali ad esempio la geotermia e/o le fondazioni energetiche,
- il miglioramento idraulico e meccanico dei terreni naturali con tecniche di bioingegneria.

CONTESTO

SEDIMENTI DRAGATI



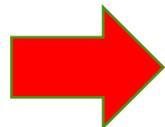
GUSCI DI MITILI



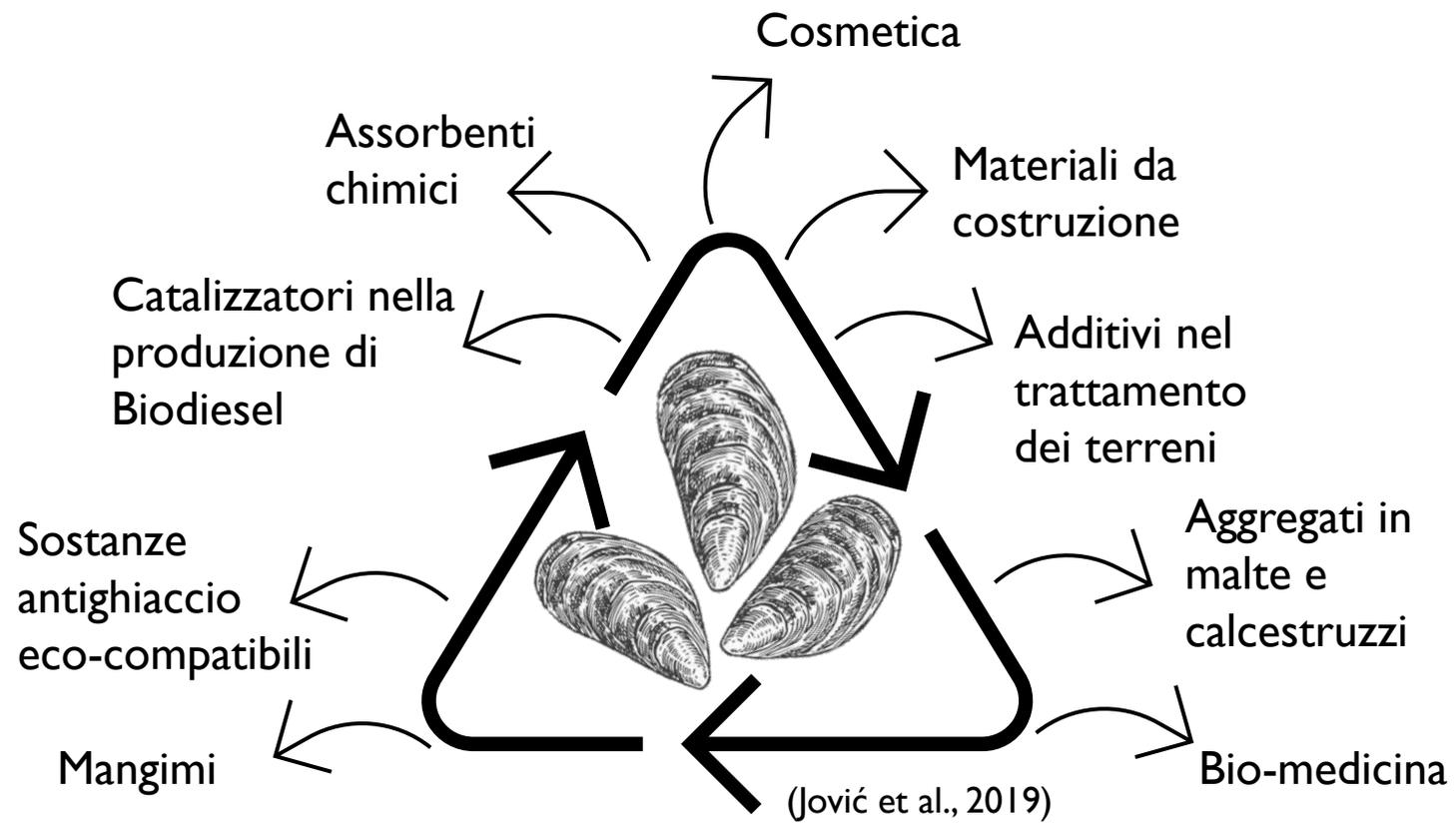
BACKGROUND

Solo a Taranto, più di 2 tonnellate al giorno vengono conferite in discarica e circa 10 tonnellate al giorno vengono smaltite irregolarmente.

In Europa si stimano circa 230.000 tonnellate all'anno.



GUSCI DI MITILI



BACKGROUND

MAR PICCOLO

Obiettivi principali:

1. Caratterizzazione ambientale completa del sito
2. Indirizzi per la bonifica del sito



Prof. Federica Cotecchia

scientific reports

Check for updates

OPEN A geo-chemo-mechanical study of a highly polluted marine system (Taranto, Italy) for the enhancement of the conceptual site model

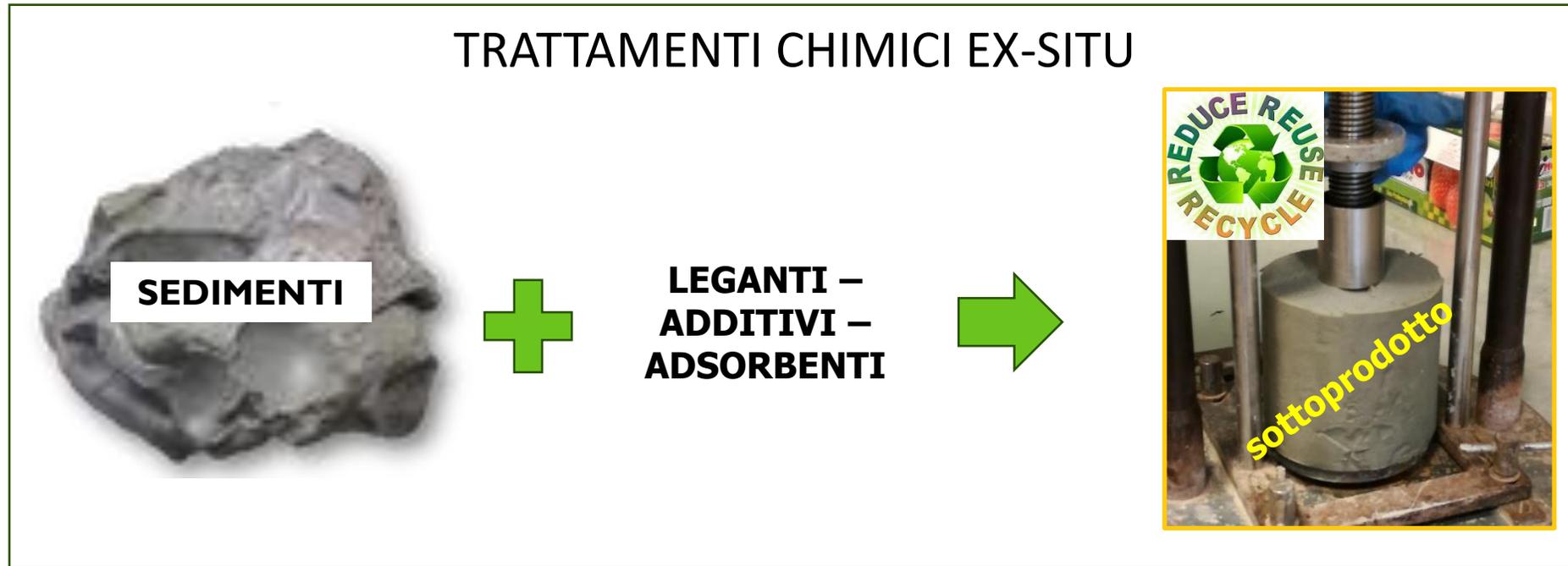
F. Cotecchia¹, C. Vitone¹, F. Sollecito^{1,2}, M. Mali^{1,2}, D. Miccoli¹, R. Petti¹, D. Milella¹, G. Ruggieri¹, O. Bottiglieri¹, F. Santaloia³, P. De Bellis¹, F. Cafaro², M. Notarnicola¹, F. Todaro¹, F. Adamo², A. Di Nisio², A. M. L. Lanzolla², M. Spadavecchia², M. Moretti⁴, G. Agrosi⁴, F. De Giosa⁴, P. Fago⁴, M. Lacalamita⁴, S. Lisco⁴, P. Manzari⁴, E. Mesto⁴, G. Romano⁴, G. Scardino⁴, E. Schingaro⁴, A. Siniscalchi⁴, G. Tempesta⁴, E. Valenzano⁴, G. Mastronuzzi⁴, N. Cardellicchio⁵, A. Di Leo⁵, L. Spada⁵, S. Giandomenico⁵, M. Calò⁵, V. F. Uricchio⁶, G. Mascolo⁶, G. Bagnuolo⁶, R. Ciannarella⁶, A. Tursi⁷, G. Cipriano⁷, P. Cotugno⁷, L. Sion⁷, R. Carlucci⁷, G. Capasso⁸, G. De Chiara⁸, G. Pisciotta⁸, R. Velardo⁸ & V. Corbelli⁸



Politecnico
di Bari

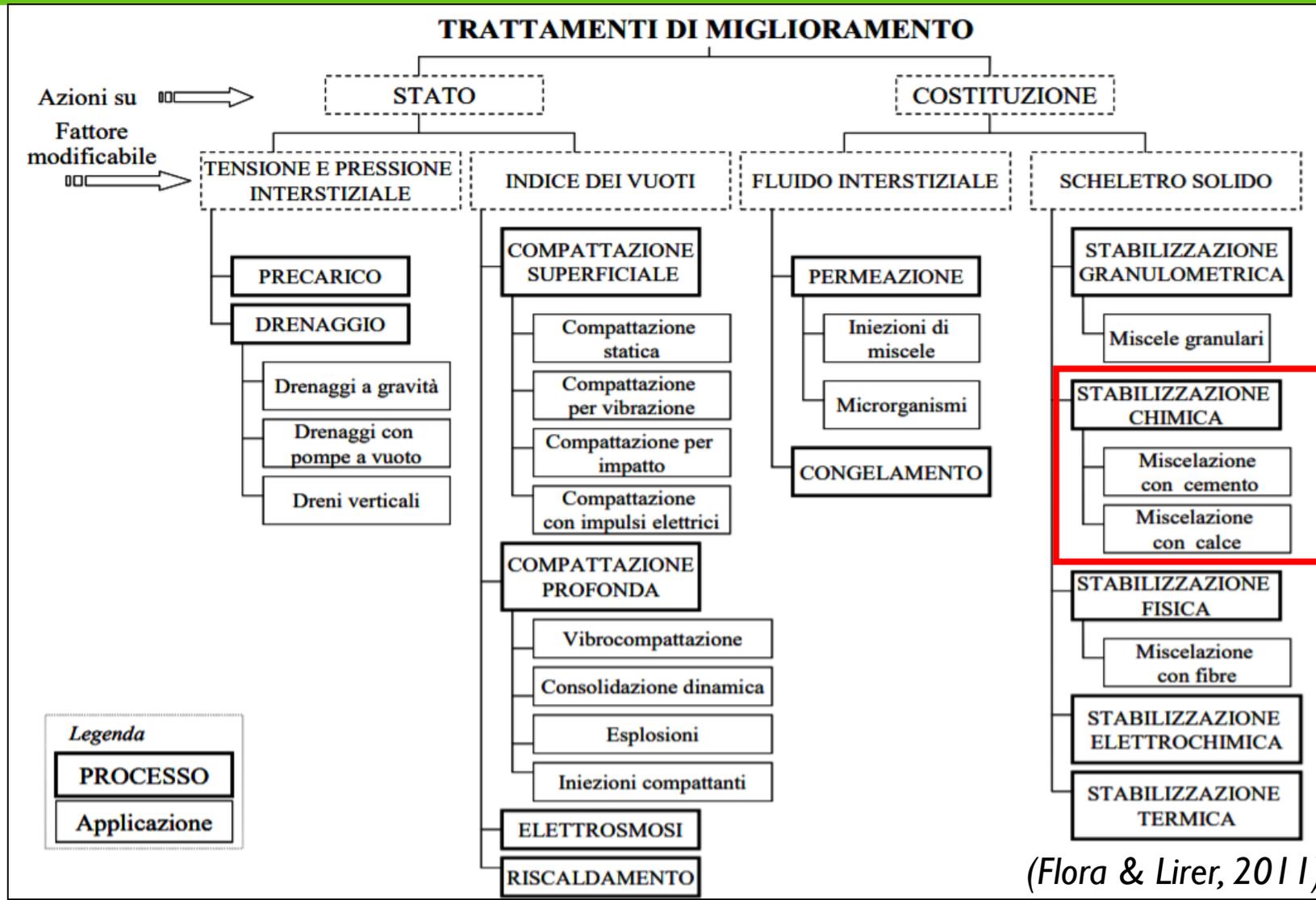


IL DESTINO DEI SEDIMENTI DRAGATI: DA RIFIUTO A RISORSA

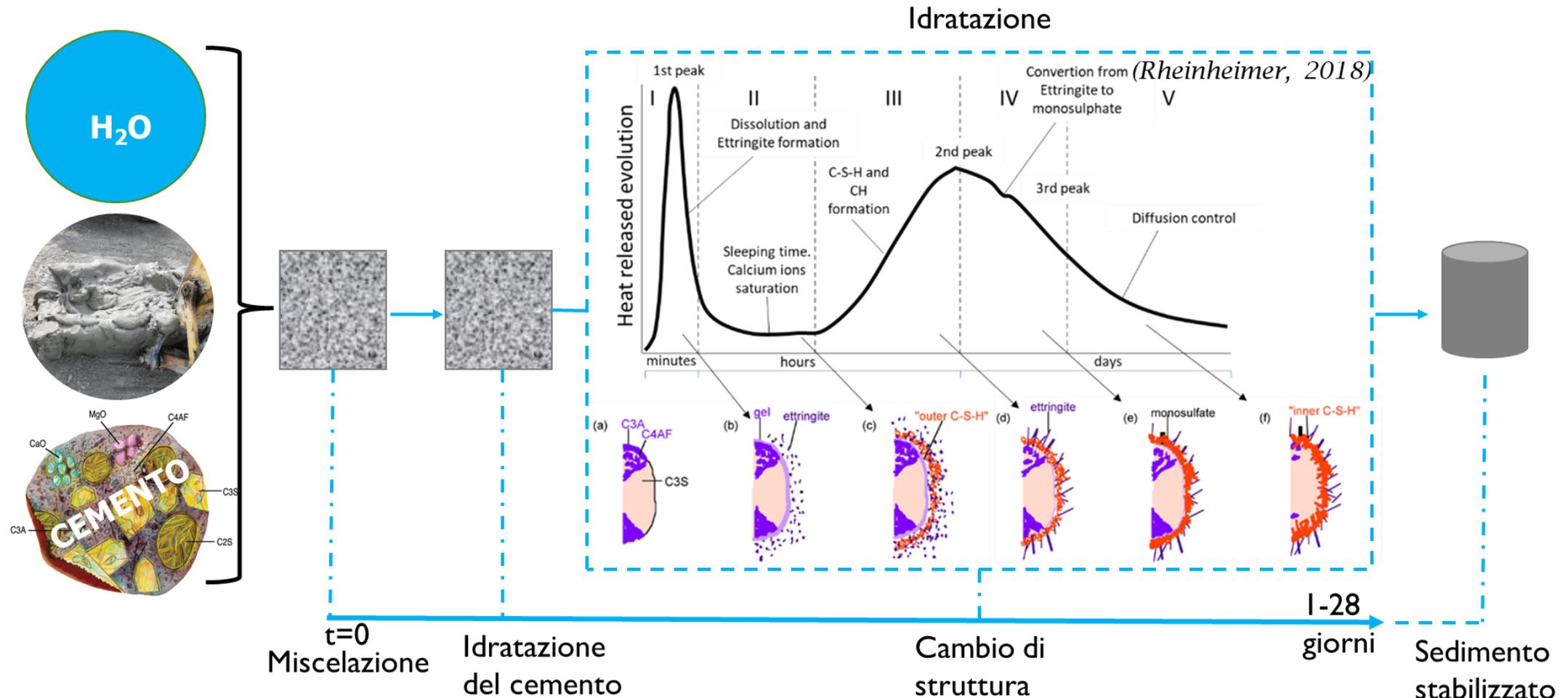


Keller, 1982; Consoli et al., 2000; Tang et al., 2001; Horpibulsuk et al., 2001, 2004, 2014; Tremblay et al., 2001, 2002; Lorenzo & Bergado, 2004; Xiao et al., 2009; Grubb et al., 2010; Chiu et al., 2009; Sasanian & Newson, 2014; Rios et al., 2014; ...

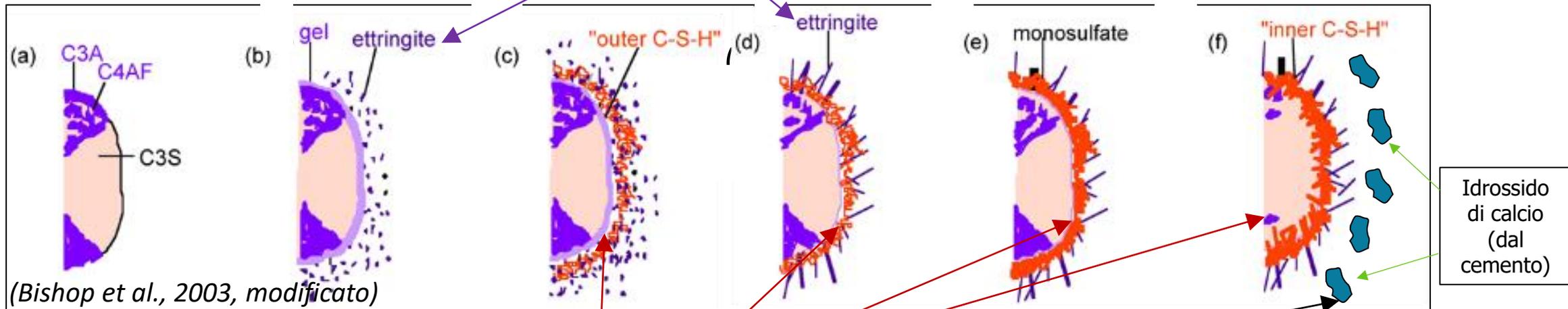
CLASSIFICAZIONE DEGLI INTERVENTI



TRATTAMENTI DI MIGLIORAMENTO MECCANICO CON IL CEMENTO



REAZIONI DI IDRATAZIONE NELLA MATRICE CEMENTO-ACQUA

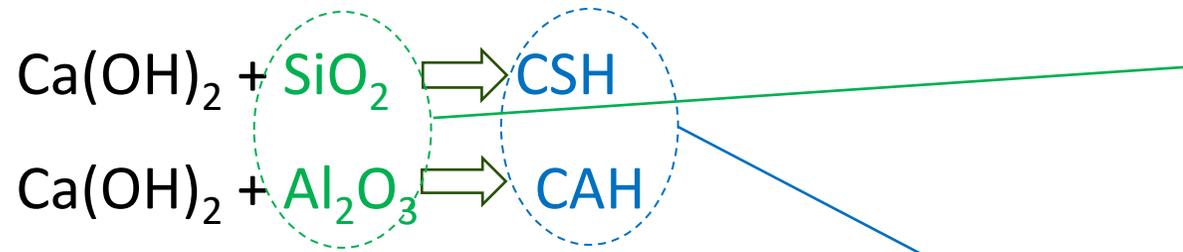


Reazioni di idratazione

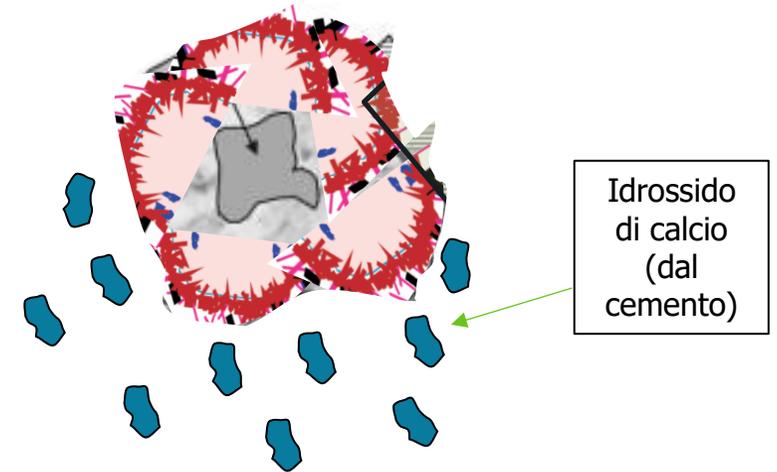


REAZIONI DI IDRATAZIONE NELLA MATRICE CEMENTO-ACQUA- SEDIMENTO A GRANA FINE

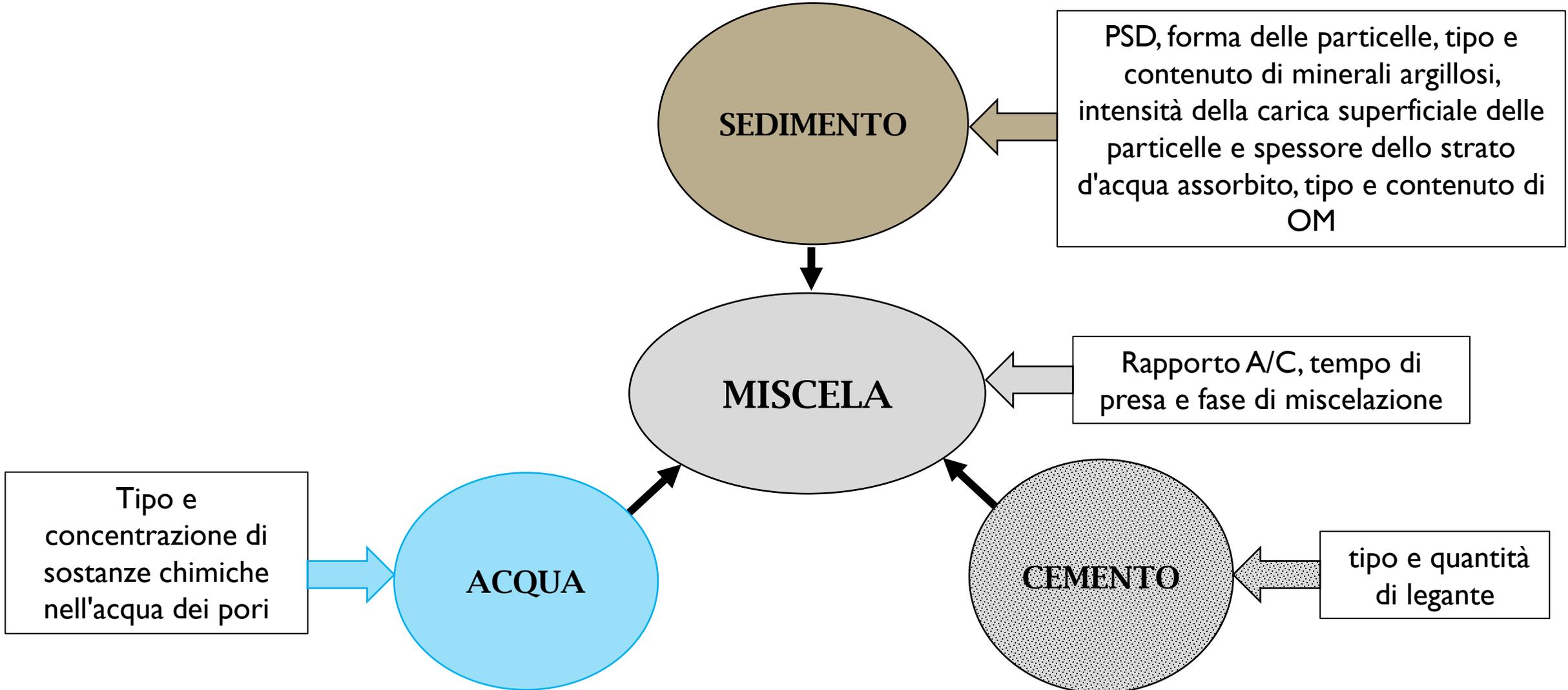
Avvengono ulteriori reazioni pozzolaniche tra $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (prodotto dai processi di idratazione) e silicio e alluminio del sedimento:



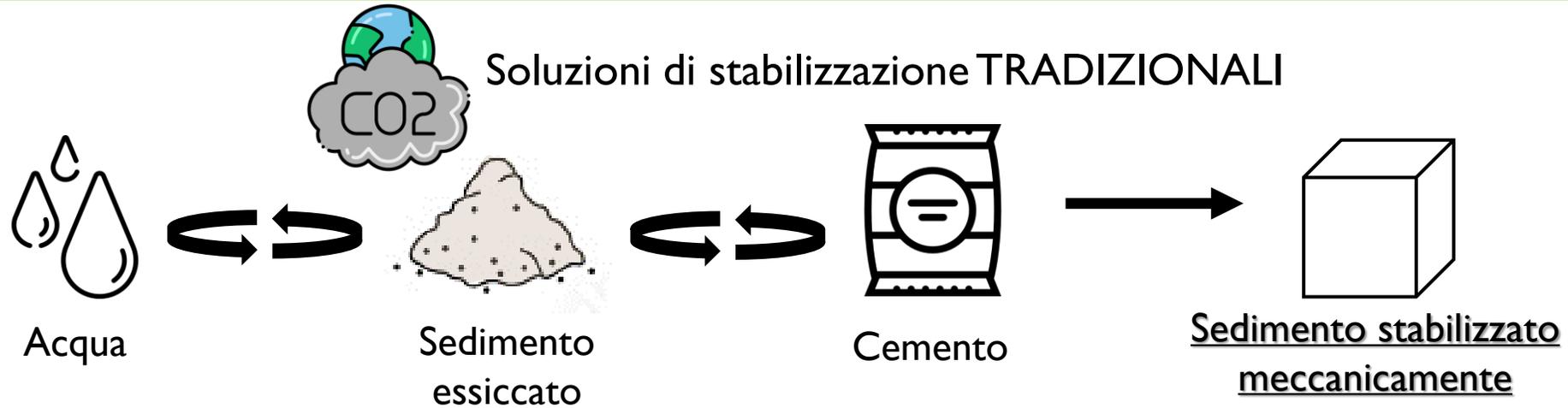
(S= SiO_2 , H = H_2O , C= CaO and A= Al_2O_3).



TRATTAMENTI CON CEMENTO (ATTORI E FATTORI)



APPROCCIO E STRATEGIA

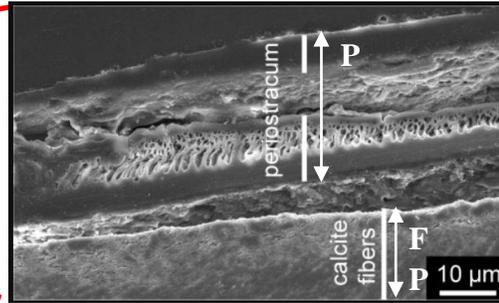


APPROCCIO E STRATEGIA

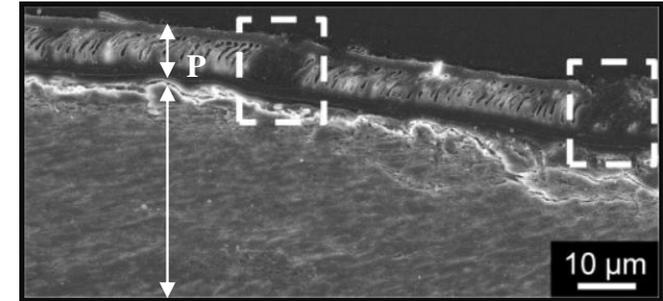
Struttura a «mattoni e malta»



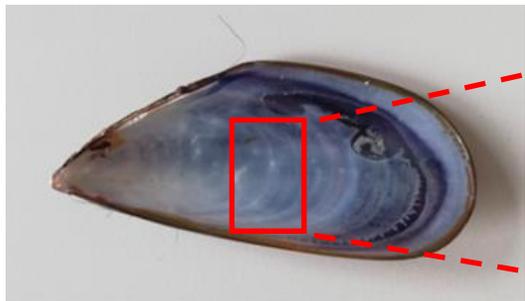
Parte esterna del guscio
Mytilus galloprovincialis



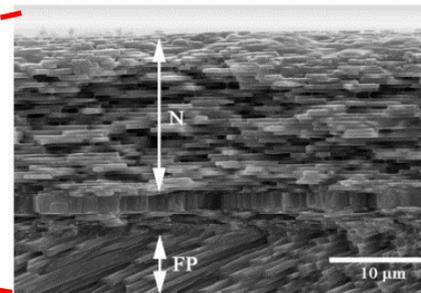
Periostraco (P) e strato a struttura prismatica (FP)



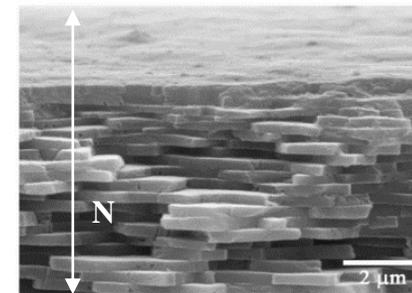
Periostraco (P) e strato a struttura prismatica (FP)



Parte interna del guscio
Mytilus galloprovincialis



Strato a struttura prismatica (FP) e strato di madreperla (N)

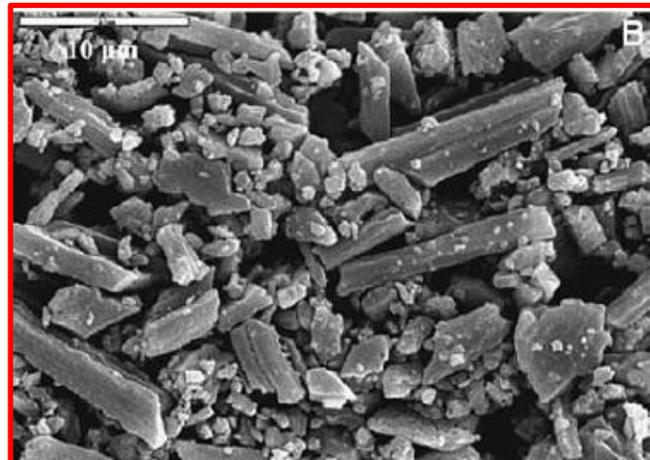
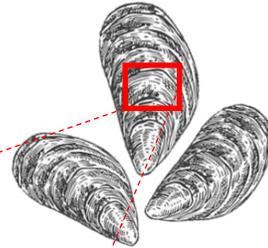


Strato di madreperla (N)

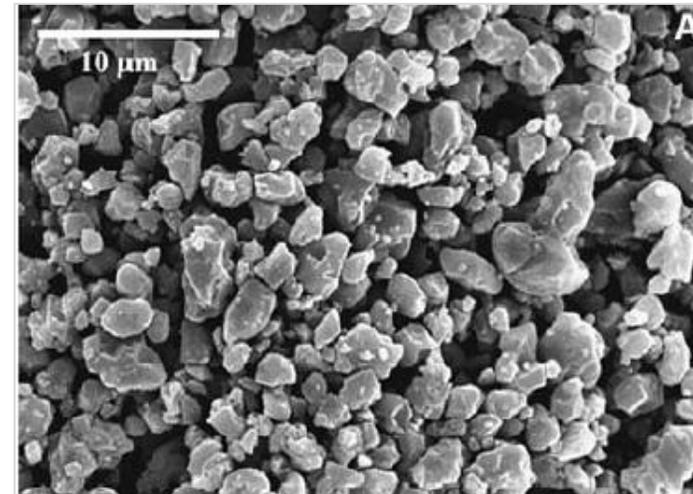
APPROCCIO E STRATEGIA

Forma allungata:

Si creano più prodotti di idratazione grazie al maggior numero di reazioni chimiche tra minerali di cemento, gusci di mitili e particelle di argilla dei sedimenti.



GUSCI DI MITILI- CaCO_3 biogenico



CALCARE- CaCO_3 geogenico

Composizione chimica:
Principalmente carbonato di calcio

APPROCCIO E STRATEGIA

Preparazione e caratterizzazione dei MATERIALI DI BASE
(Sedimenti, leganti e farina di gusci di mitili)

Trattamento di stabilizzazione meccanica

Soluzioni tradizionali

Sedimenti naturali + cemento

Soluzioni alternative

Sedimenti naturali + cemento parzialmente
sostituito da **farina di gusci di mitili**

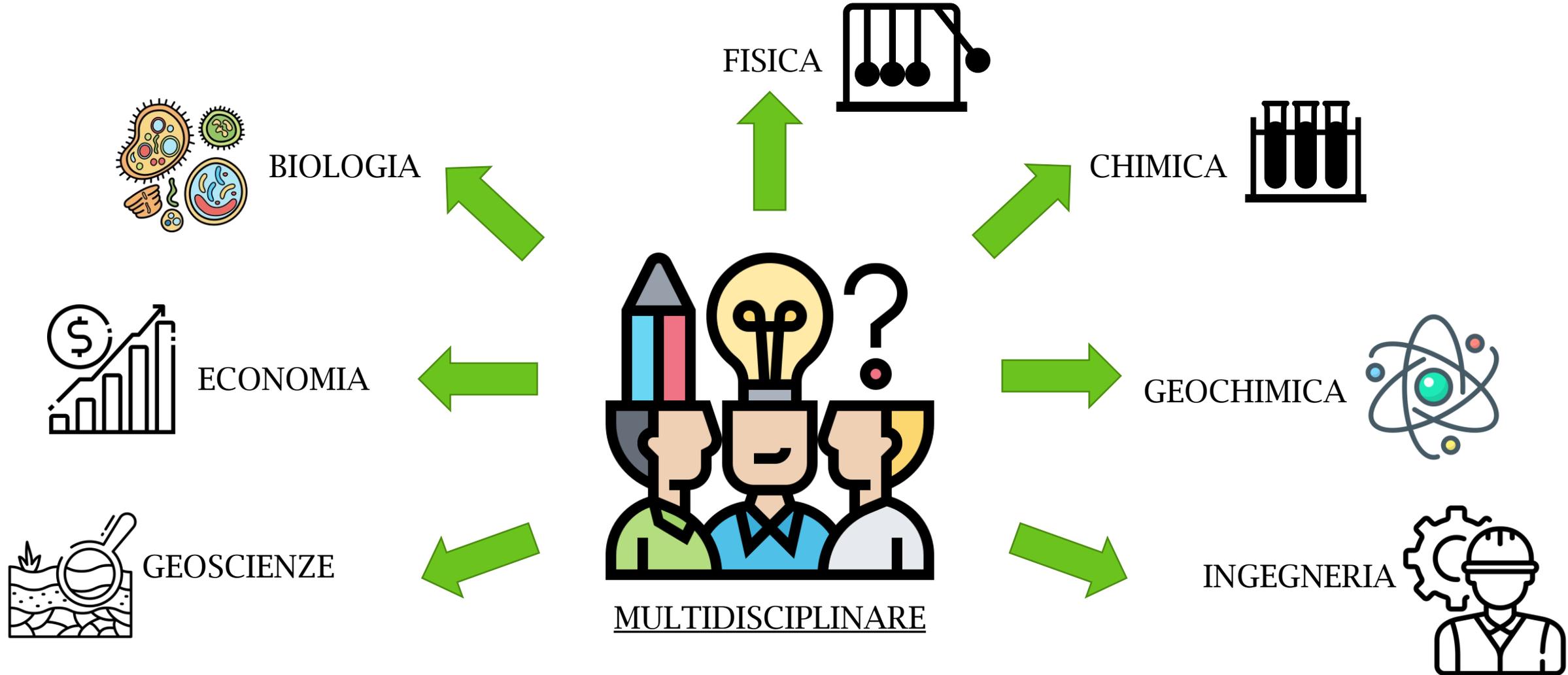
Caratterizzazione **geo-chemo-idro-meccanica** dei
sedimenti stabilizzati

Analisi micro:
SEM, XRD, FT-IR, MIP

Analisi chimiche, geochimiche e
termiche:
pH, EC, salinità, Solfati e Cloruri,
CEC, calorimetria, test di
lisciviazione

Caratterizzazione geo-idro-
meccanica:
proprietà fisiche, plasticità, prove
edometriche e prove triassiali, prove
in consolidometro, texturometro

APPROCCIO E STRATEGIA



SEDI DELLE ATTIVITÀ

GEOTECH-Lab Politecnico di Bari, Taranto



GEOTECH-Lab Politecnico di Bari, Bari



Kilometro rosso i.lab
Italcementi, Bergamo 9 mesi



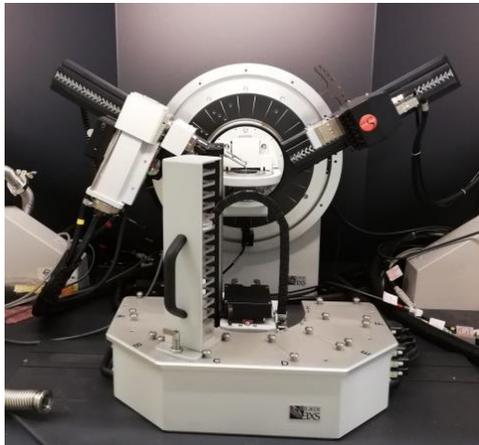
Hönggerberg campus, ETH- Zurich 9 mesi



PIANO DELLE ATTIVITÀ

Sedimento naturale: caratterizzazione geo-chemo-idro-meccanica

i.lab Italcementi HeidelbergCement Group	GEOTECH-Lab Politecnico di Bari	Clay Lab ETH - Zurich
<ul style="list-style-type: none">• XRF• Texturometro	<ul style="list-style-type: none">• Prelievo sedimento• Test fisici• Test idromeccanici:<ul style="list-style-type: none">- Compressione ID- Taglio diretto- TRX	<ul style="list-style-type: none">• MIP• TIC/TOC• XRED; FT-IR• CEC; pH; Salinità, solfati e cloruri dell'acqua di mare



PIANO DELLE ATTIVITÀ

Sedimento + cementi commerciali: caratterizzazione geo-chemo-idro-meccanica

i.lab Italcementi HeidelbergCement Group	GEOTECH-Lab Politecnico di Bari	Clay Lab ETH - Zurich
<ul style="list-style-type: none">• Texturometro• Calorimetro• Test di identificazione	<ul style="list-style-type: none">• Test fisici• Test idromeccanici:<ul style="list-style-type: none">- Compressione 1D- Taglio diretto- TRX- Compressione uniassiale	<ul style="list-style-type: none">• MIP• TIC/TOC• XRED• FT-IR• CEC; pH; solfati e cloruri



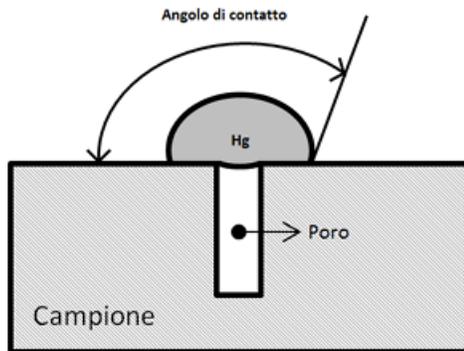
PIANO DELLE ATTIVITÀ

Sedimento + leganti *alternativi*: caratterizzazione geo-chemo-idro-meccanica

i.lab Italcementi - HeidelbergCement Group	GEOTECH-Lab Politecnico di Bari	Clay Lab ETH - Zurich
<ul style="list-style-type: none">• Trattamento dei gusci• Analisi XRF dei gusci• Analisi XRF dei cementi• Creazione della soluzione alternative di stabilizzazione• Texturometro; Calorimetro	<ul style="list-style-type: none">• Test fisici• Test idromeccanici:<ul style="list-style-type: none">- Compressione 1D- Taglio diretto- TRX- Compressione uniassiale	<ul style="list-style-type: none">• MIP• XRED• FT-IR• CEC• pH; Solfati e cloruri dell'acqua di maturazione



ANALISI AL POROSIMETRO AD INTRUSIONE DI MERCURIO (MIP)



Il mercurio è un metallo liquido avente una bagnabilità molto bassa, infatti, se una goccia viene depositata su una superficie, l'angolo di contatto è maggiore di 90° . Inoltre, se la superficie contiene dei pori, il mercurio non è in grado di penetrare al loro interno a meno che non venga fornita una pressione esterna sufficientemente elevata. Questo è il principio sui cui si basa lo strumento: **si misura la quantità di mercurio che entra nel campione in funzione della pressione esterna applicata.**

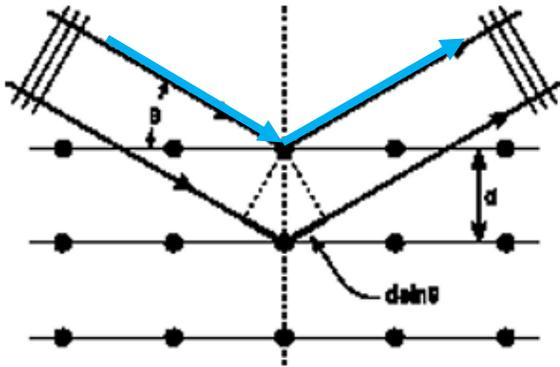
Equazione di Washburn (1921), la dimensione dei pori corrispondente viene calcolata dalla pressione applicata

$$r = -2\gamma \cdot \cos(\theta) / p$$

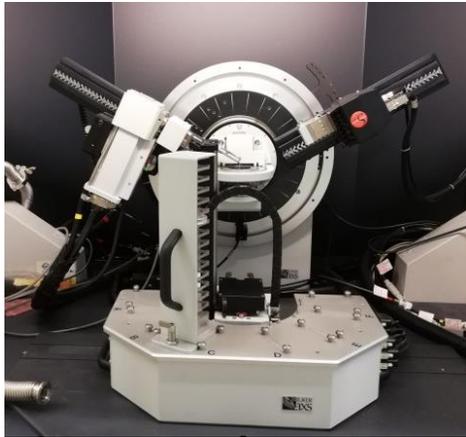
r =raggio dei pori, p = pressione in bar, γ = tensione superficiale del mercurio (4800 N/m) e θ è l'angolo di contatto (assunto pari a 130°)



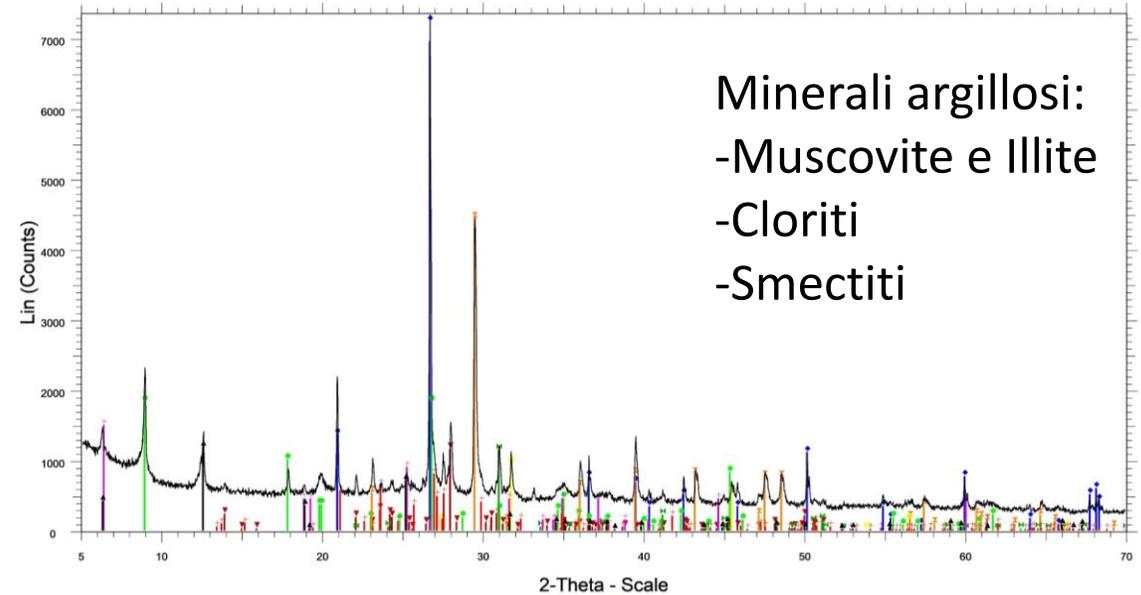
ANALISI DI DIFFRAZIONE A RAGGI X (XRD)



Principio di funzionamento: gli atomi del reticolo cristallino del campione che si vuole analizzare causano una rifrazione del fascio di raggi X con cui viene colpito e successivamente si misura l'angolo e l'intensità dei raggi rifratti.



Analizzando il pattern di diffrazione che si genera in funzione dell'angolo d'incidenza, è possibile risalire alla forma e alle dimensioni dei reticoli cristallini che compongono il materiale analizzato



Minerali argillosi:
-Muscovite e Illite
-Cloriti
-Smectiti

Limbo argilloso Taranto - File: dx2018-0306.raw
00-046-1045 (*) - Quartz, syn - SiO2
00-007-0042 (I) - Muscovite-3T - (K,Na)(Al,Mg,Fe)2(Si3.1Al0.9)O10(O
00-029-0701 (I) - Clinocllore-1Mlib, Fe-rich - (Mg,Fe)6(Si,Al)4O10(OH
00-009-0466 (*) - Albite, ordered - NaAlSi3O8
00-005-0586 (*) - Calcite, syn - CaCO3
00-036-0426 (*) - Dolomite - CaMg(CO3)2
00-005-0628 (*) - Halite, syn - NaCl
00-031-0794 (I) - Corrensite - (Mg,Al)9(Si,Al)8O20(OH)10·4H2O
00-031-0966 (*) - Orthoclase - KAISi3O8

ALCUNI RISULTATI: PREPARAZIONE DEL BIO-ADDITIVO POLVERE DI MITILI

Lavaggio



Trattamento termico
(105°C per 48h)



Macinazione



Setacciatura



POLVERE DI GUSCI
DI MITILI, MSP

$D_{50} = 6.32 \mu\text{m}$
 $C_u = D_{60}/D_{10} = 2.213$

ETH

Eidgenössische Technische Hochschule Zürich
Swiss Federal Institute of Technology Zurich

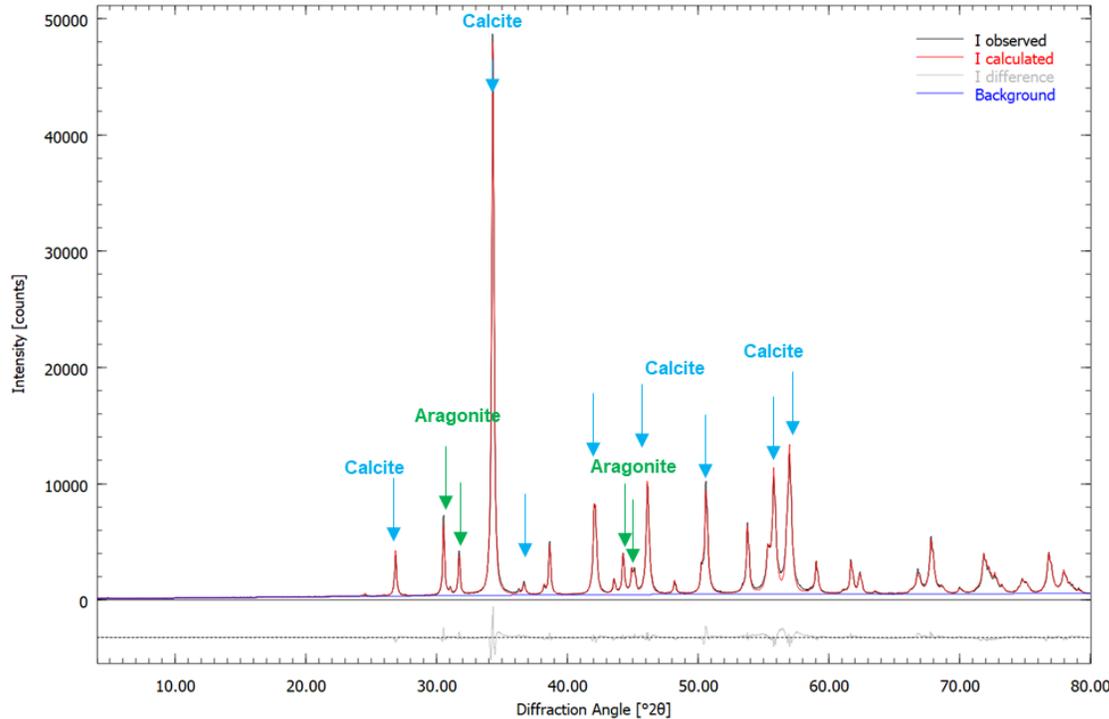


Politecnico
di Bari



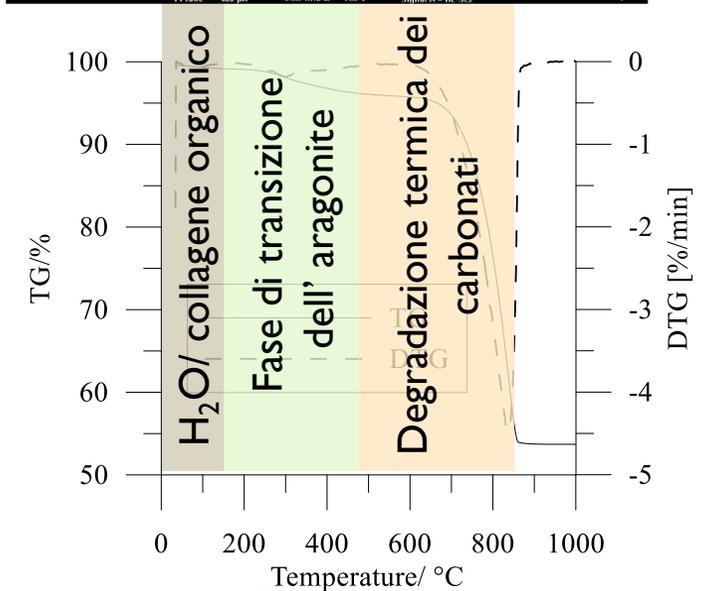
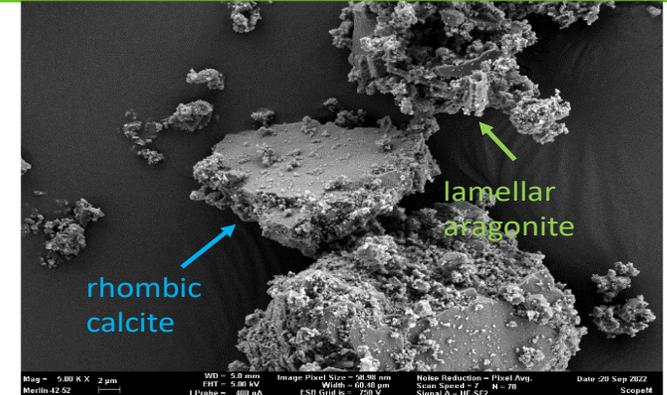
ALCUNI RISULTATI: CARATTERIZZAZIONE DEL BIO-ADDITIVO POLVERE DI MITILI

pH= 8.8

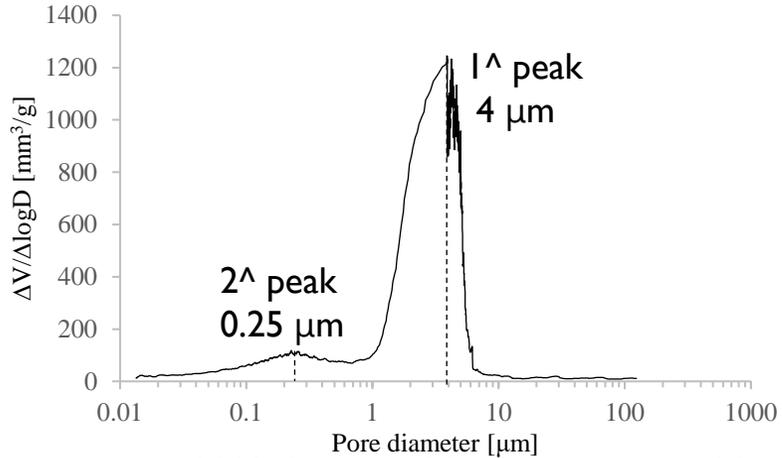


Mineral (m%)	MSP	3s
Quartz	0.3	0.1
Calcite	73.0	0.4
Aragonite	26.7	0.4
Total Non-clay	100.0	

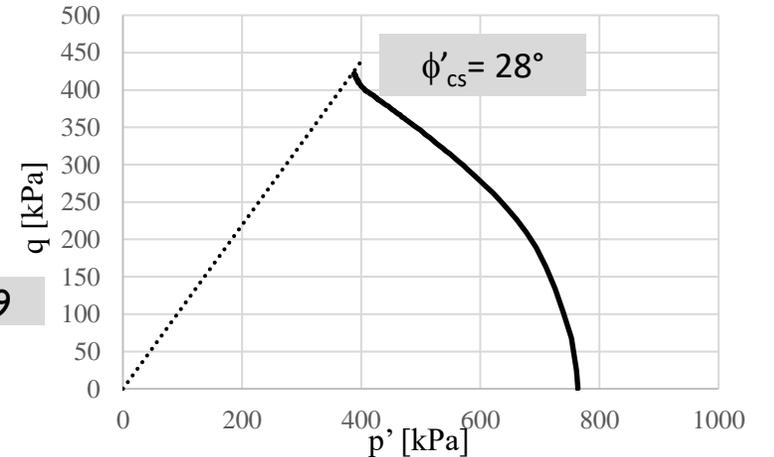
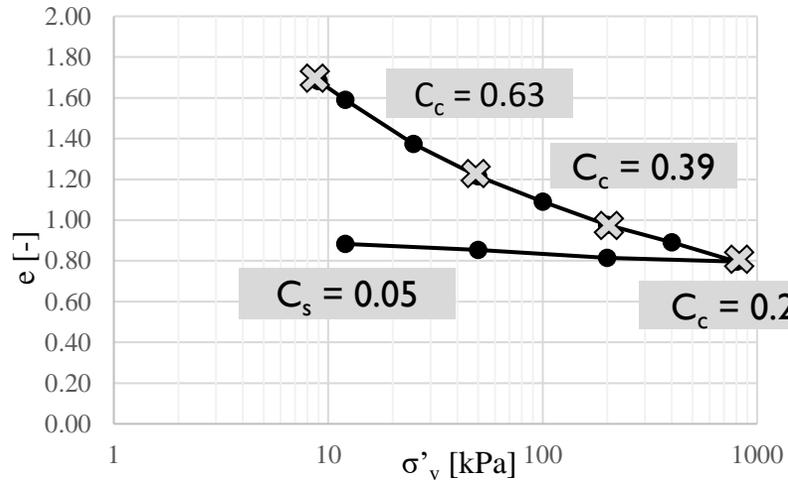
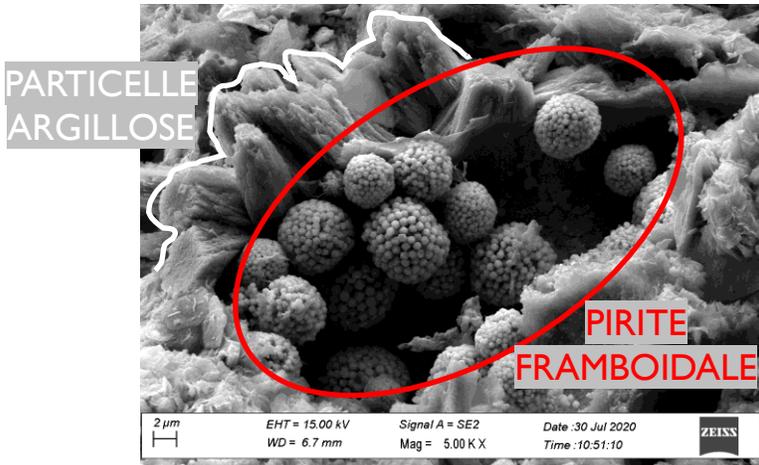
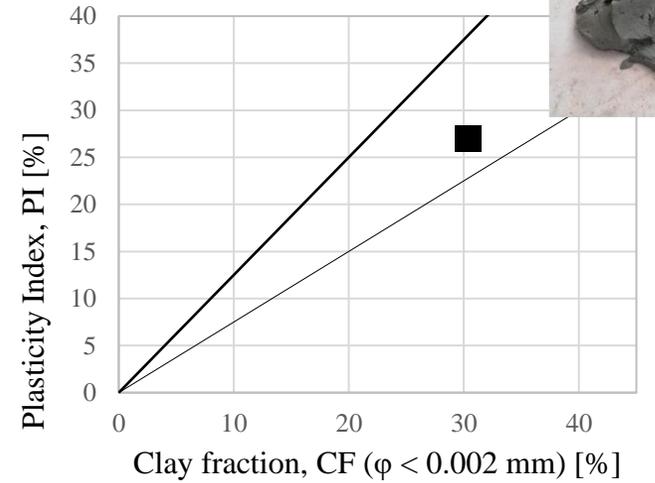
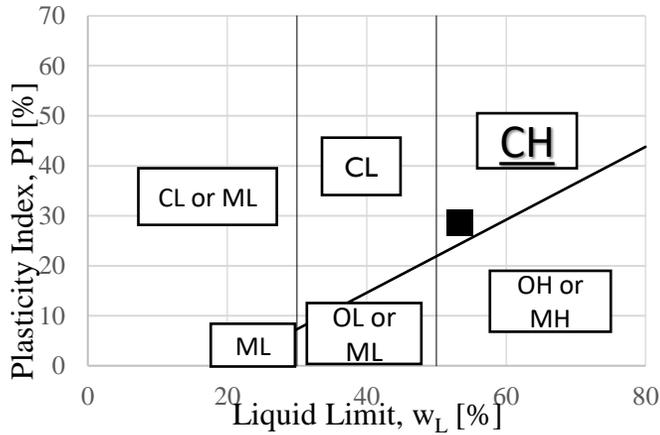
CaCO₃ di origine biogenica costituito da **Calcite** e **Aragonite** aghiforme metastabile



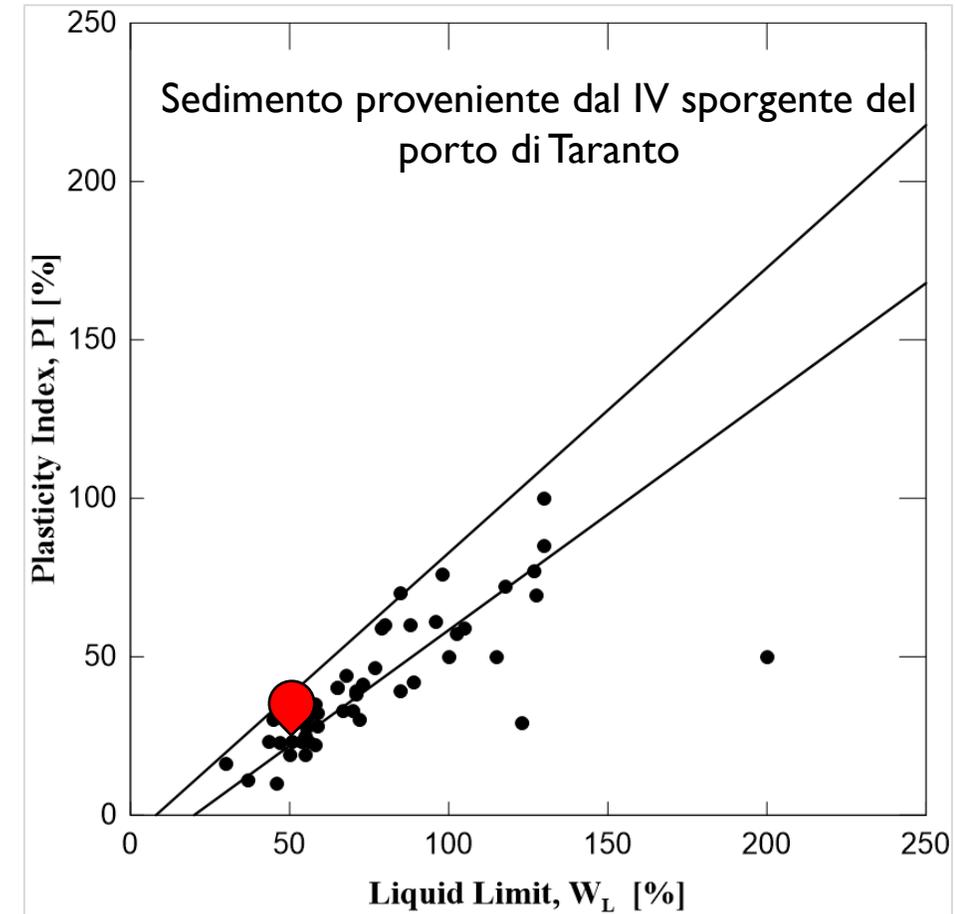
ALCUNI RISULTATI: CARATTERIZZAZIONE DEL SEDIMENTO NATURALE



(Tanaka et al. 2002; Sasanian, 2011; Hattab et al., 2015)



ALCUNI RISULTATI: CARATTERIZZAZIONE DEL SEDIMENTO NATURALE



PROGRAMMA SPERIMENTALE

ULTRACEM 52.5 R (PC)

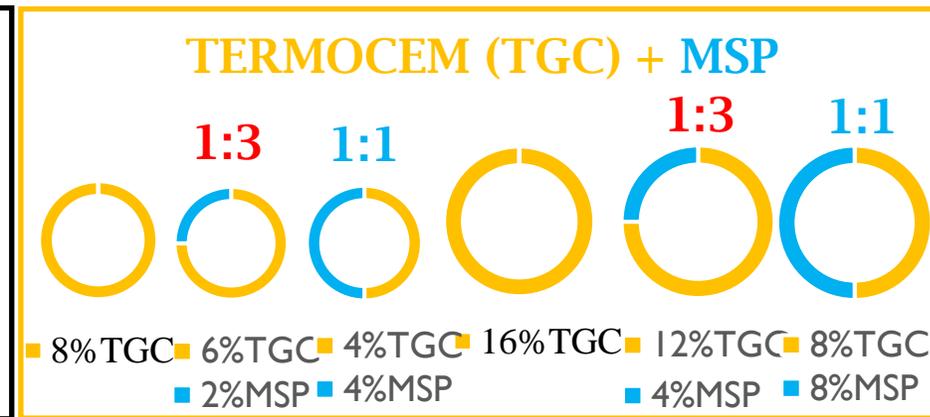
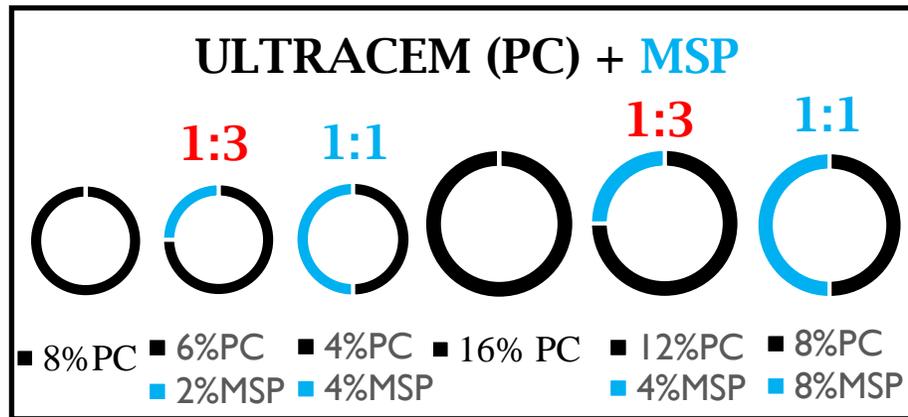
emissioni di CO₂ > 750 kg/t

TERMOCEM GREEN (TGC) 

emissioni di CO₂ < 550 kg/t



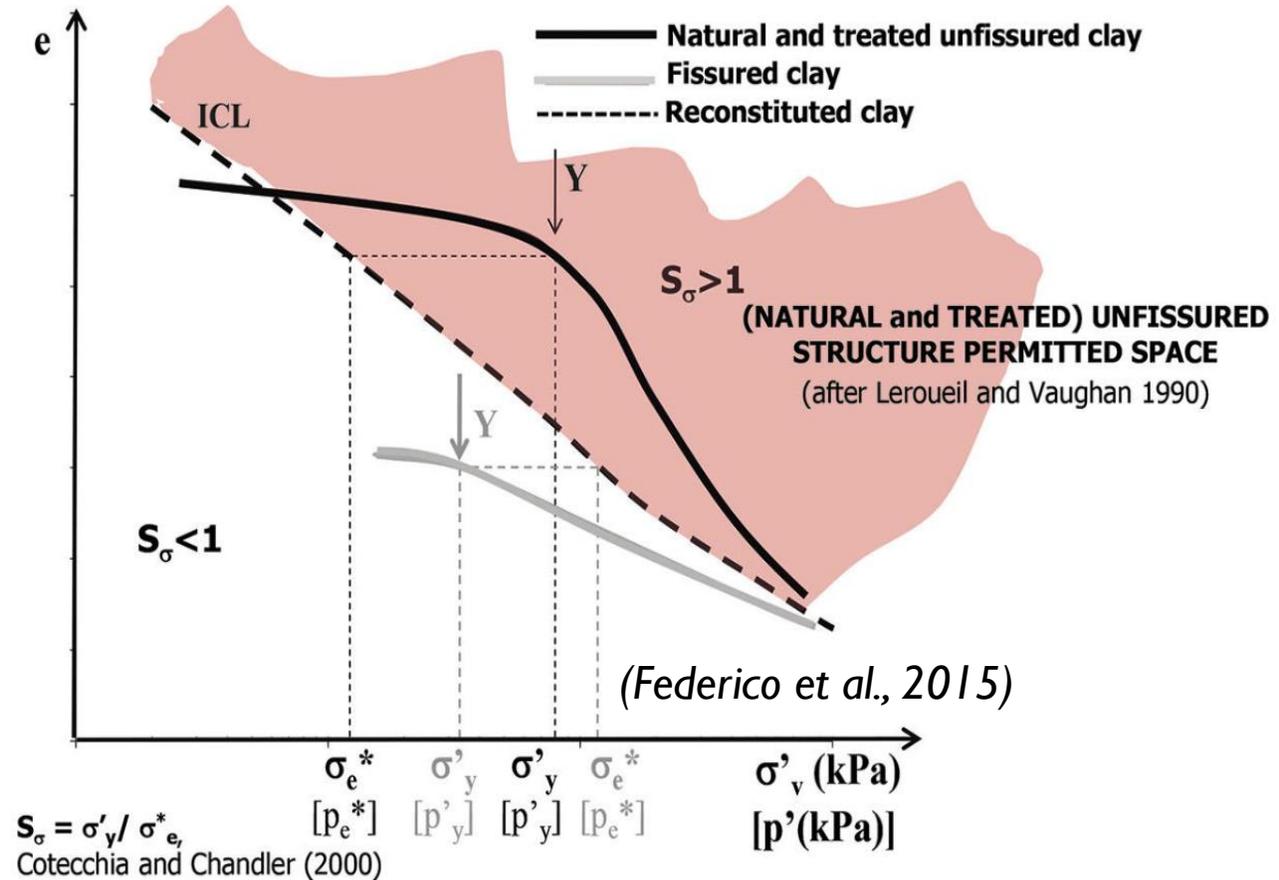
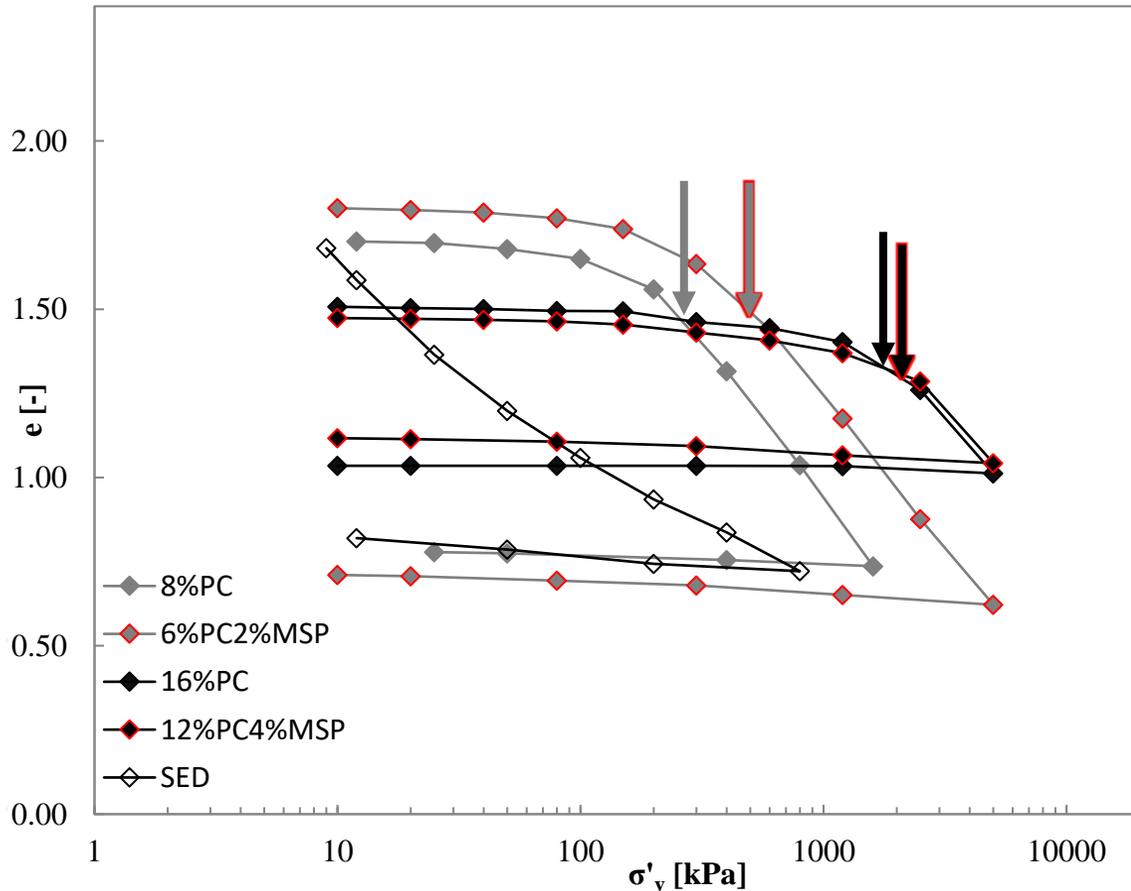
+ w₀ = 73%



Oxides (%)	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	P ₂ O ₅	SrO	MnO	TiO ₂	LOI
TGC	44.9	8.25	1.48	32.81	5.79	0.52	0.81	3.61	0.05	0.09	0.15	0.38	1.27
PC	63.06	3.92	4.51	18.09	1.59	0.5	0.93	4.13	0.11	0.03	0.07	0.22	2.64
MSP	53.6	0.02	-	0.038	0.239	0.355	0.034	0.197	0.034	-	-	-	45.58

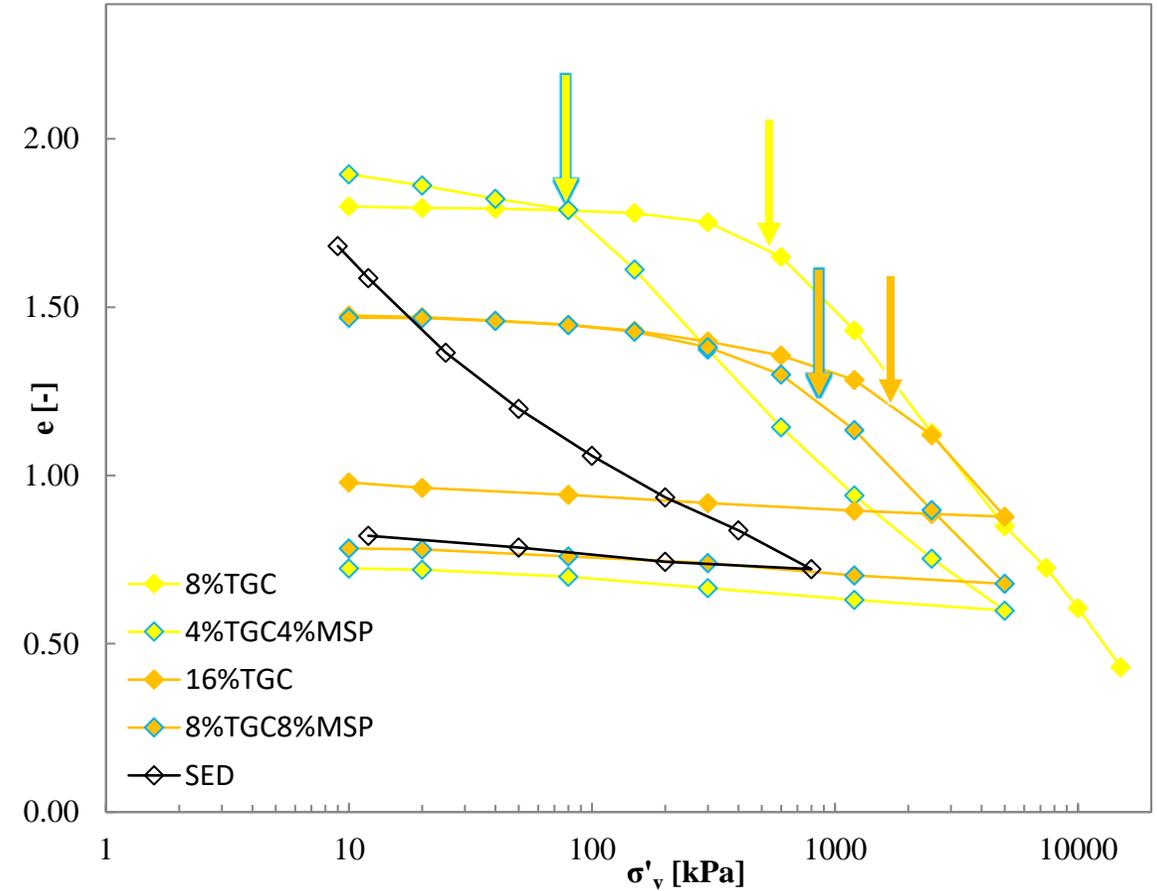
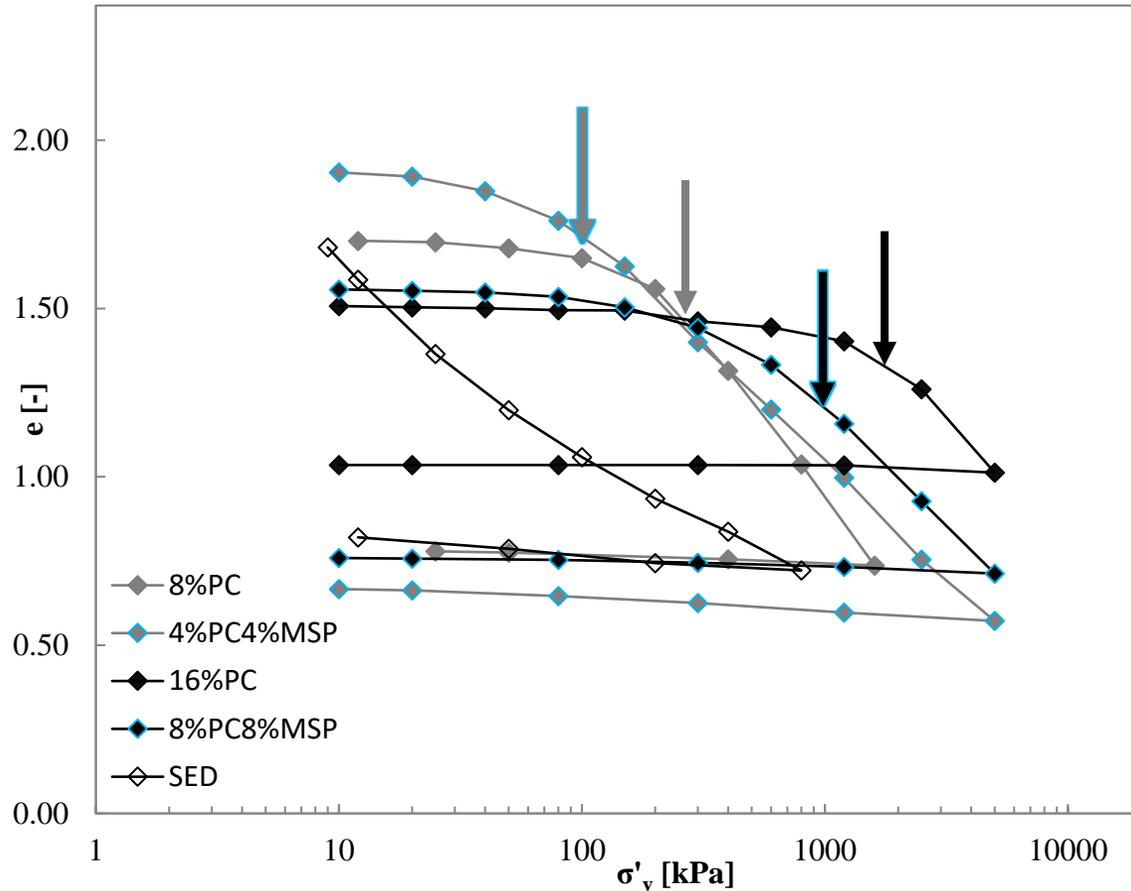
ALCUNI RISULTATI: COMPRESSIONE MONODIMENSIONALE

RAPPORTO POLVERE DI MITILI : CEMENTO = 1:3



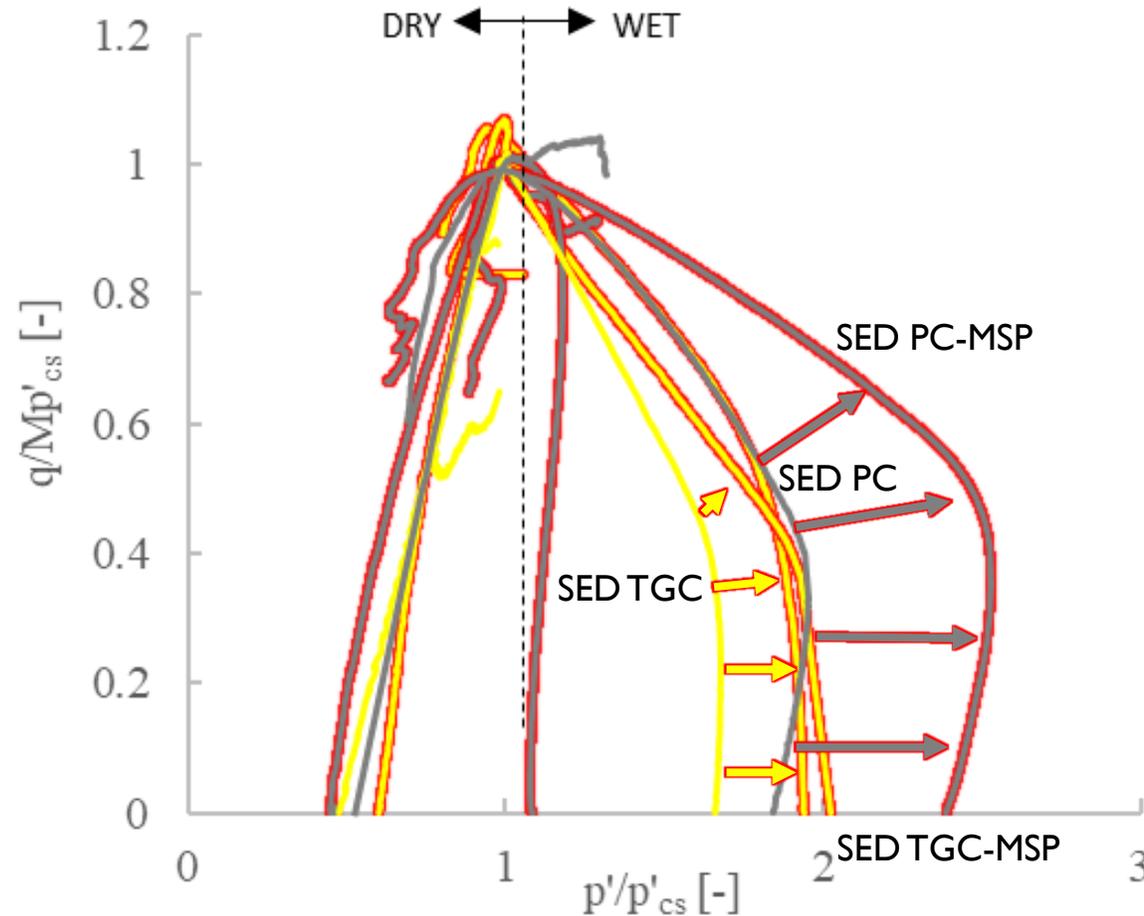
ALCUNI RISULTATI: COMPRESSIONE MONODIMENSIONALE

RAPPORTO POLVERE DI MITILI : CEMENTO = 1:1



ALCUNI RISULTATI: TRXCIU

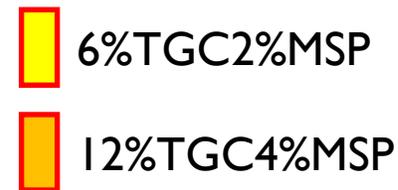
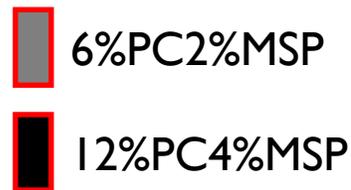
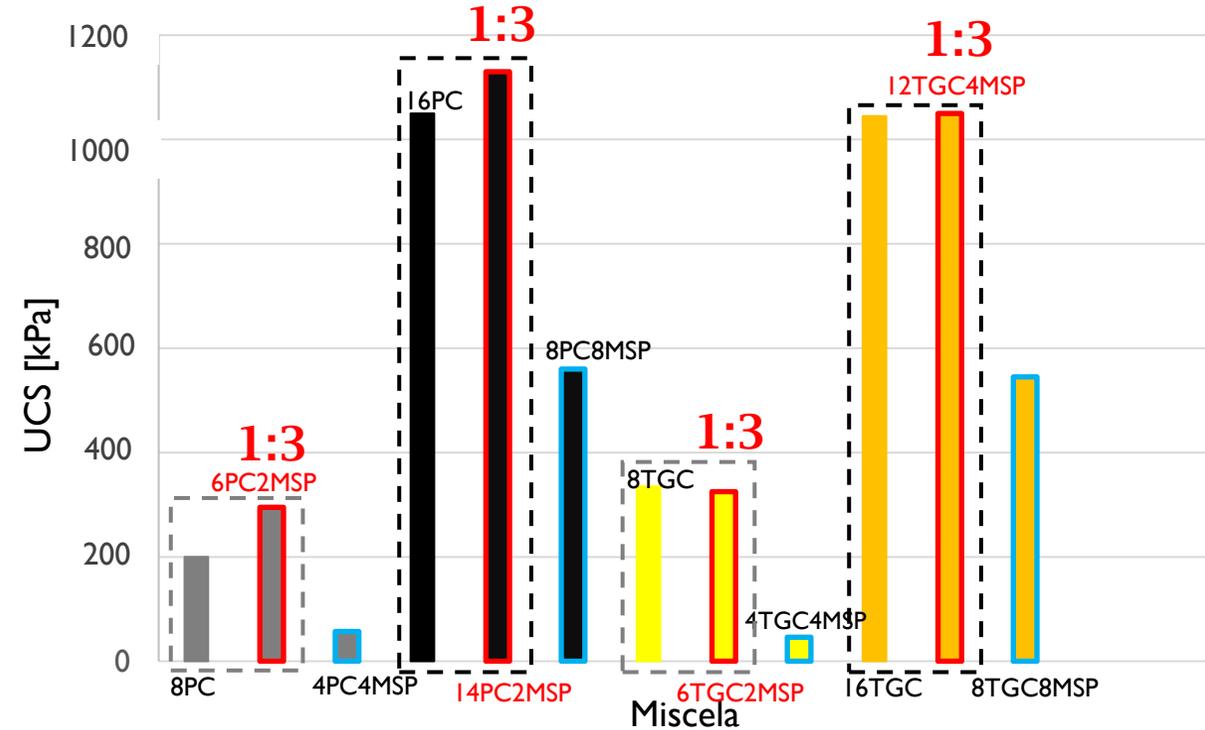
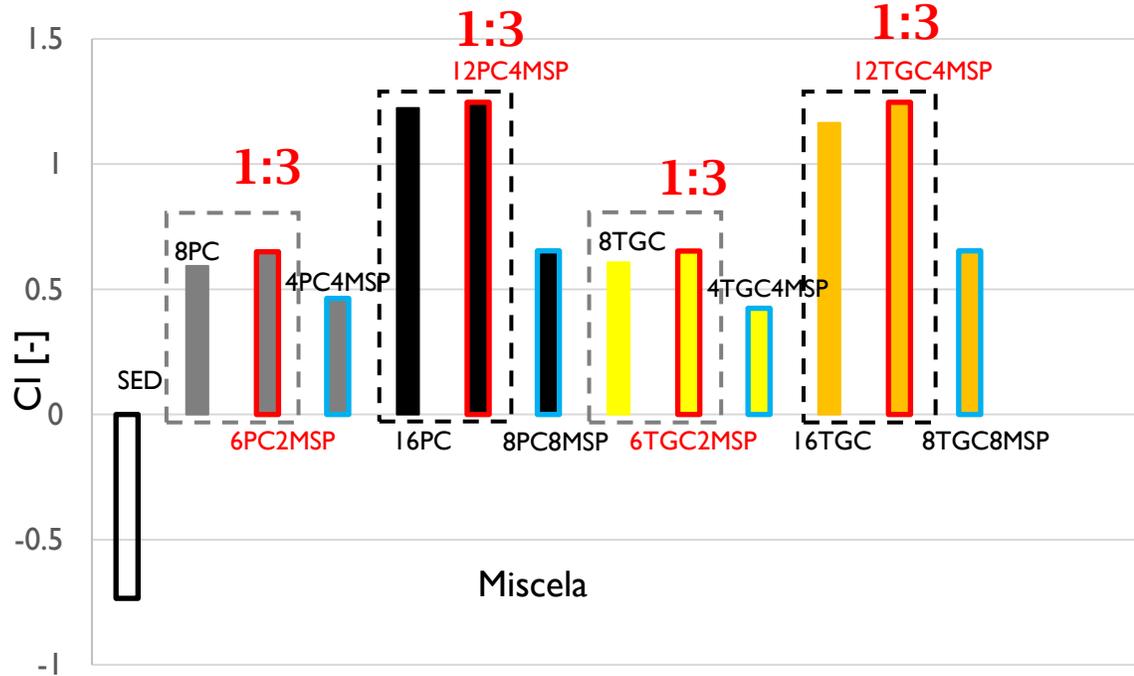
RAPPORTO POLVERE DI MITILI : CEMENTO = 1:3



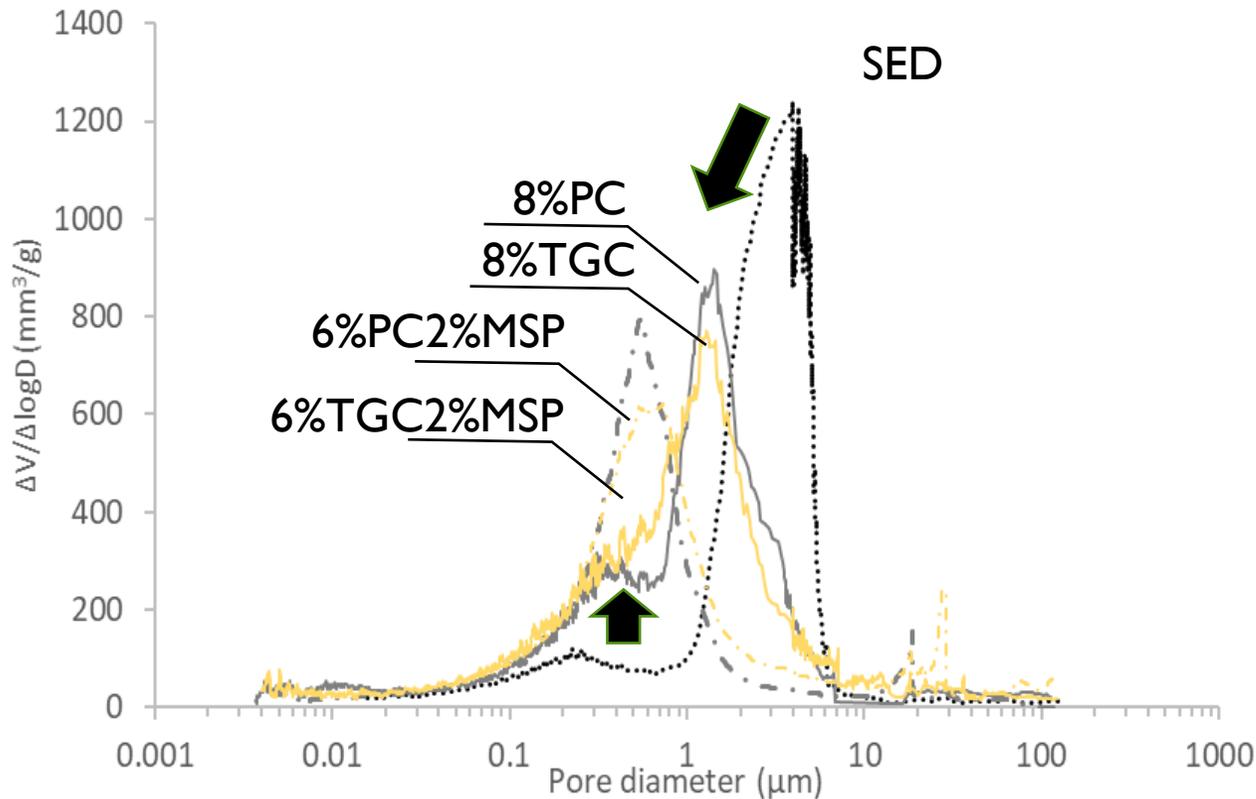
SBS: superficie limite di stato ovvero la superficie oltre la quale il materiale subisce un collasso strutturale

La presenza della **farina di gusci di mitili** nei sedimenti trattati provoca un'evoluzione di SBS

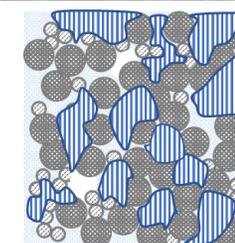
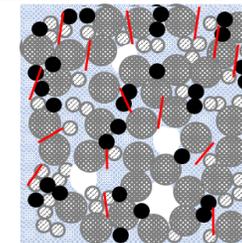
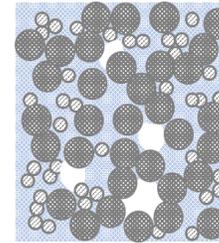
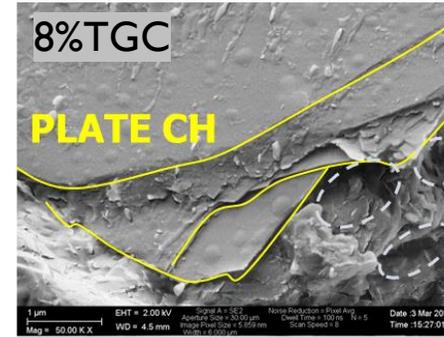
ALCUNI RISULTATI: CONSISTENZA E RESISTENZA A COMPRESSIONE UNIASSIALE



ALCUNI RISULTATI: ANALISI MIP E SEM



MSP: distribuzione porosimetrica bimodale → monomodale



- Limo (0.002- 0.06 mm)
- Argilla (< 0.002 mm)
- Acqua
- Aria

- Cemento
- | Gusci di mitili
- ▨ Prodotti di idratazione del cemento

Mixture	CEC (meq/100g)
6%PC2%MSP	10.1
6%TGC2%MSP	10.4
8%PC	7
8%TGC	7

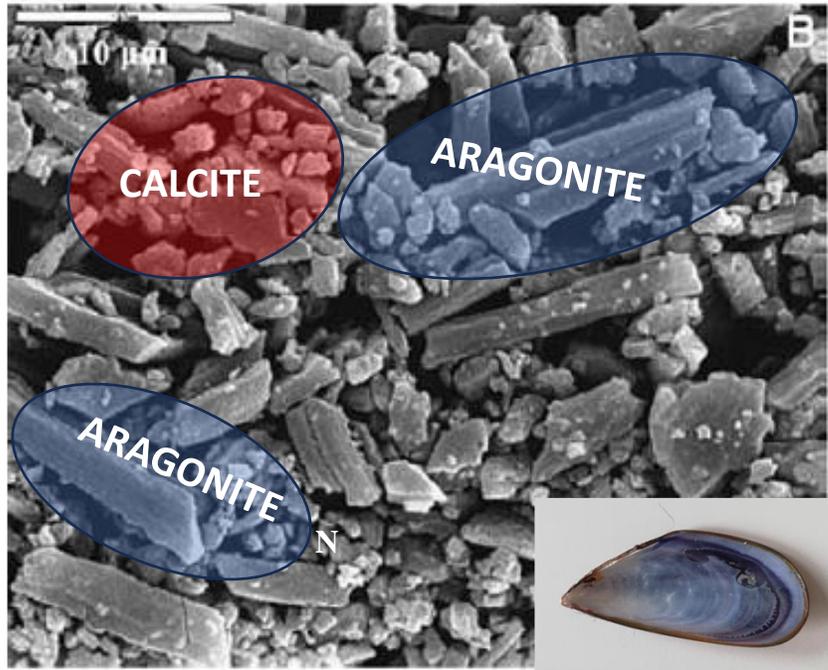
MSP: incrementa gli scambi elettrolitici tra le particelle di argilla nei sedimenti trattati

(Petti et al., 2024)

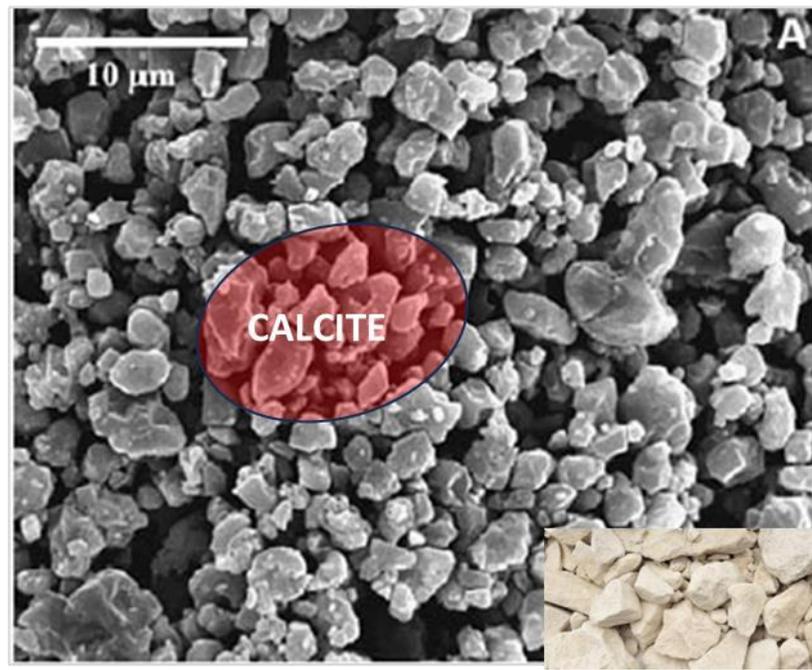
CARBONATO DI CALCIO BIOGENICO VS GEOGENICO

CARBONATO DI CALCIO BIOGENICO

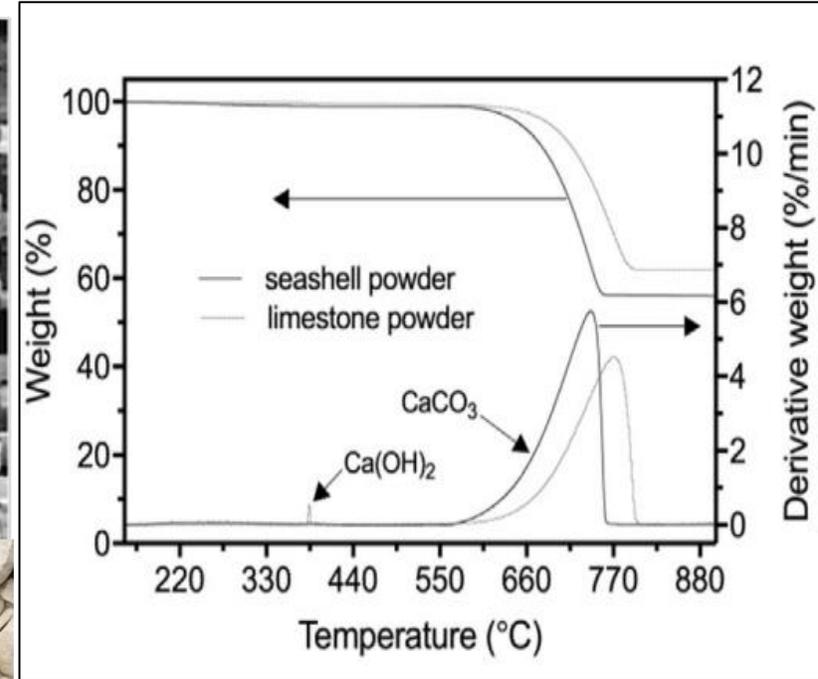
CARBONATO DI CALCIO GEOGENICO



S_5 BET gusci = 3.433 m²/g
26.7% Aragonite



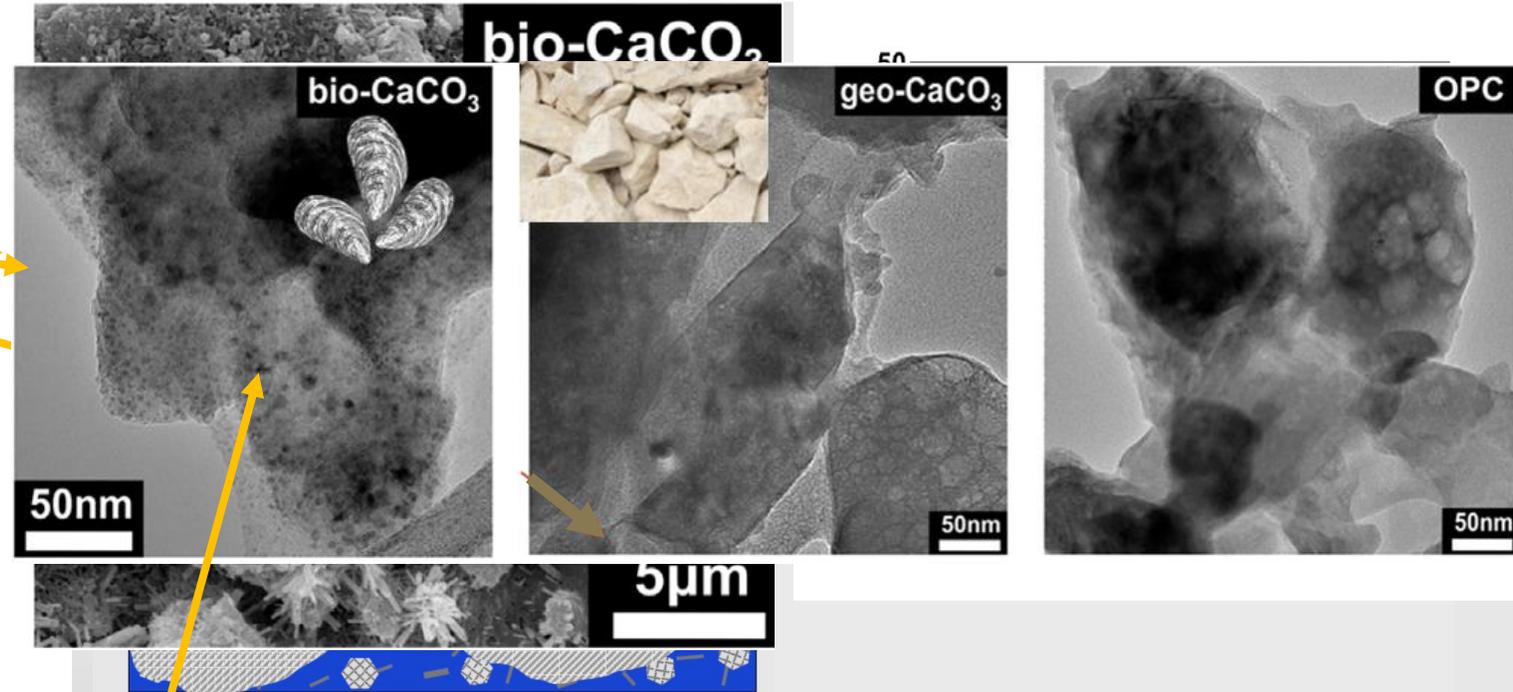
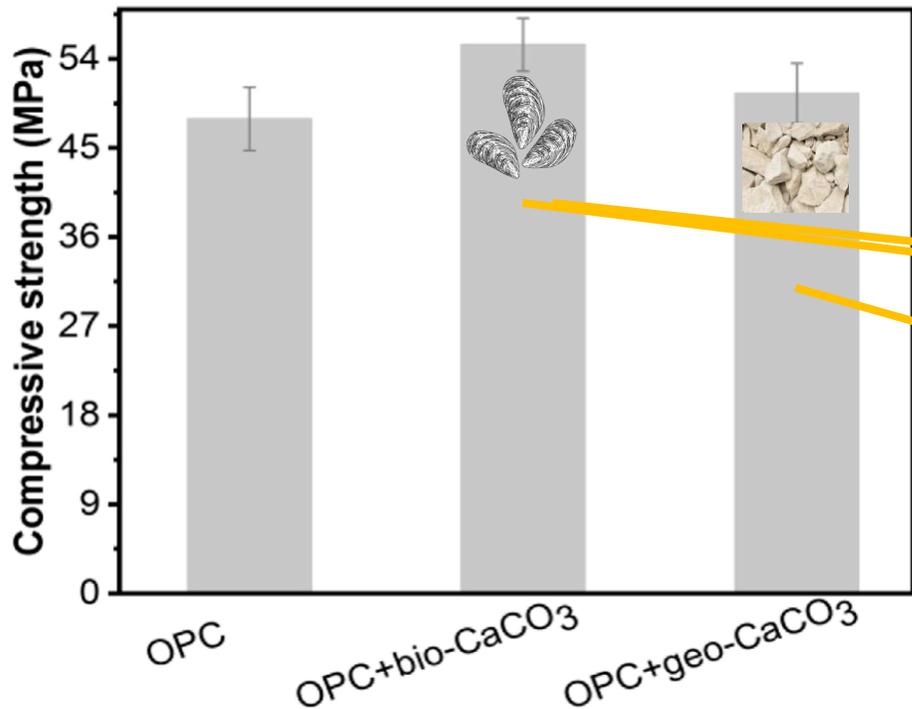
S_5 BET calcare = 1.5 m²/g,
1.78% Aragonite



□ Bio-CaCO₃: differente composizione, più alta S_5 , più bassa stabilità termica.

CEMENTO-ACQUA-CaCO₃: geogenico vs biogenico (28d)

CaCO₃ biogenico: parte geogenico e biogenico CaCO₃ a causa di idratazione del cemento



❑ Bio-CaCO₃: agisce maggiormente come sito di nucleazione per i prodotti di idratazione (più alta S_s e metastabilità).

- Parziale dissoluzione chimica del bio-CaCO₃ a causa dell'ambiente alcalino di idratazione del cemento.
- Ulteriori prodotti di idratazione (i cluster nanometrici): dal calcio dissociato e dal carbonato di MS.

POSSIBILE MODELLO: sistema CEMENTO-ACQUA-SED.- BIOCaCO_3 (MS)

ALCUNI RISULTATI: BREVETTO

Metodo per la stabilizzazione di argille marine



Politecnico
di Bari

Nome: Claudia Vitone
Qualifica: Professore associato
Ruolo: Supervisione, ideazione,
concettualizzazione, metodologia e risorse



Politecnico
di Bari

Nome: Rossella Petti
Qualifica: Assegnista Post-Doc
Ruolo: Concettualizzazione, ideazione,
metodologia, investigazione e analisi dati



Politecnico di Bari e ETH di Zurigo



INNOVHUB
STAZIONI SPERIMENTALI
PER L'INDUSTRIA
innovazione e ricerca

Nome: Maurizio Iler Marchi
Qualifica: Ricercatore
Ruolo: Ideazione, supervisione, metodologia e risorse



Nome: Alexander M. Puzrin
Qualifica: Professore ordinario
Ruolo: Supervisione e risorse



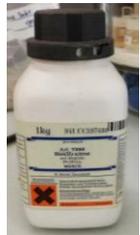
Nome: Michael Plötze
Qualifica: Ricercatore
Ruolo: Supervisione e risorse

CONCLUSIONI TRATTAMENTI MECCANICI INNOVATIVI

- MSP sembra essere un'utile prodotto, originale e sostenibile, da usare per la stabilizzazione meccanica dei sedimenti di dragaggio. Il suo utilizzo consente di ridurre il contenuto in cemento nelle miscele sedimenti - cemento.
- La MSP prodotta senza calcinazione permette di sfruttare la composizione e la morfologia dei gusci di mitili che svolgono un ruolo attivo nel processo di cementazione nelle soluzioni di stabilizzazione proposte.
- La sperimentazione in laboratorio ha mostrato che il cemento TGC (già prodotto da materiali di scarto) mostra risultati incoraggianti come il PC tradizionale.

CONTAMINAZIONE ARTIFICIALE DEL SEDIMENTO

C = 5000ppm di PIOMBO



Pb(NO₃)₂ in
acqua

+



Sedimento
naturale



Sedimento
contaminato da
Piombo, «LSED»

C = 8% di KEROSENE



Kerosene

+



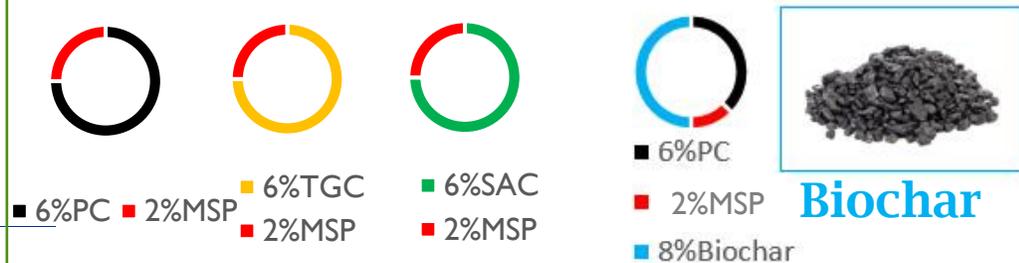
Sedimento
naturale



Sedimento
contaminato da
Kerosene, «KeSED»

Stabilizzazione CHEMO-MECCANICA

Soluzioni alternative



Soluzioni tradizionali



PREPARAZIONE DEL BIOCHAR

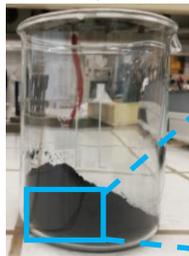
BIOCHAR: pirolisi di diversi tipi di biomassa vegetale e animale



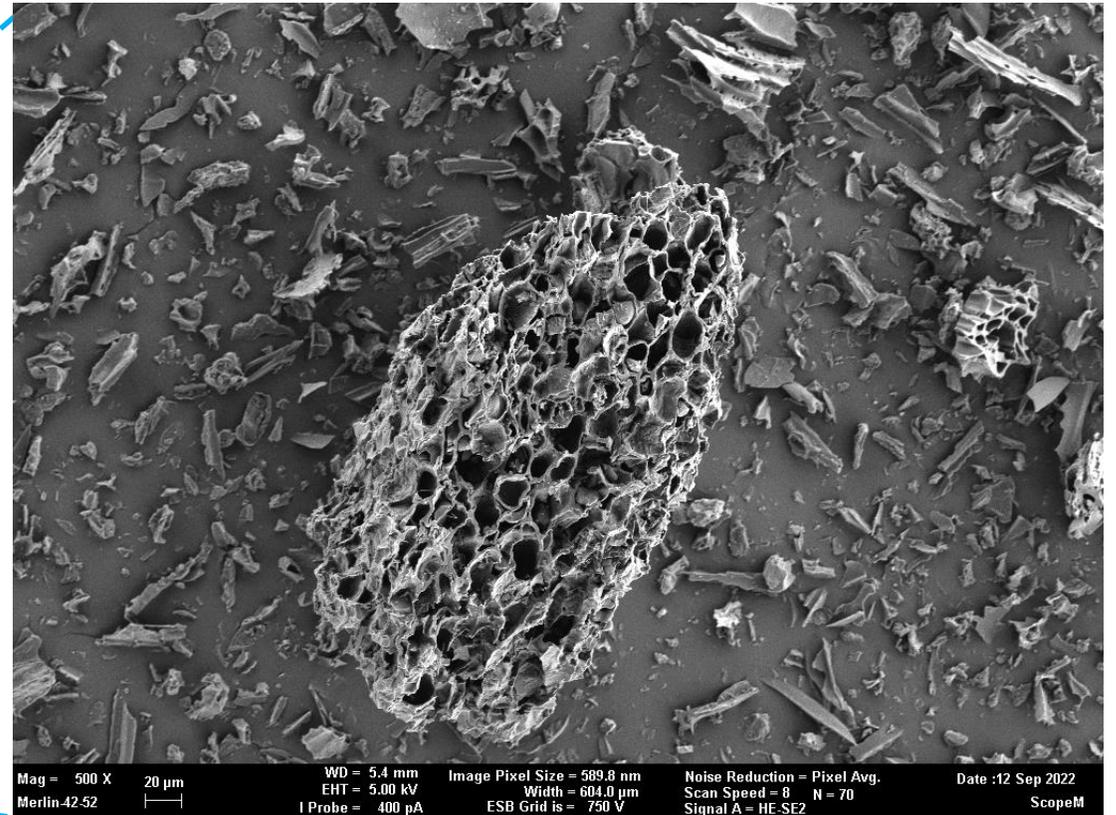
Biochar



Da trucioli di legno



Grain size < 0.25 mm



(Petti et al., in prep.)

(Chan et al., 2007; Méndez et al., 2012; Inyang et al., 2012; Ahmad et al., 2012 and 2014; Zhang et al., 2013; Houben et al., 2013; Lu et al., 2014; Oliveira et al., 2017)

TEST DI LISCIVIAZIONE

Metodo utilizzato per determinare la quantità di un soluto che può essere rilasciato da un solido in un solvente (UNI EN 12457-2)



SED in acqua o
in acido acetico



Agitazione
per 24h



Centrifuga

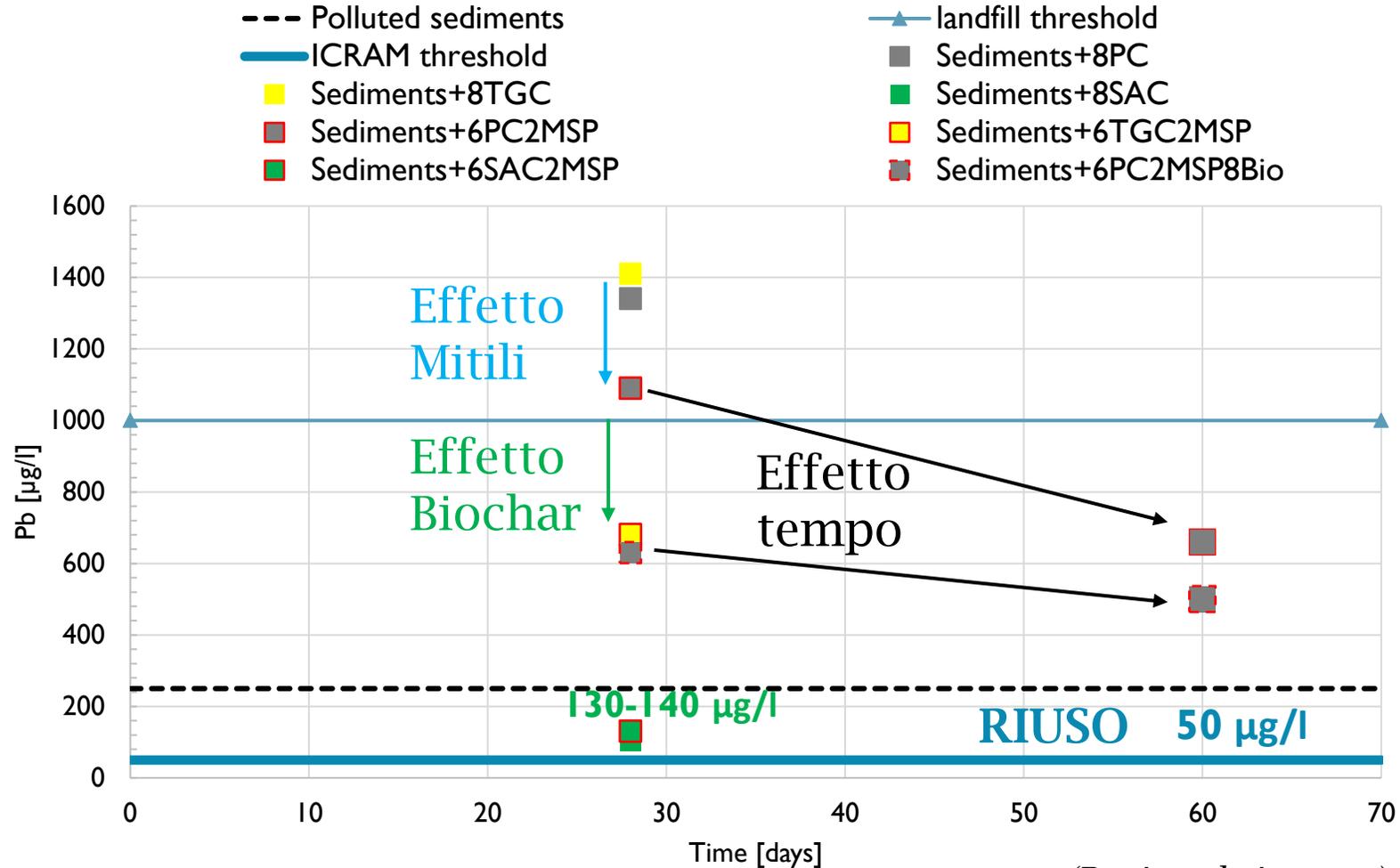


Filtraggio



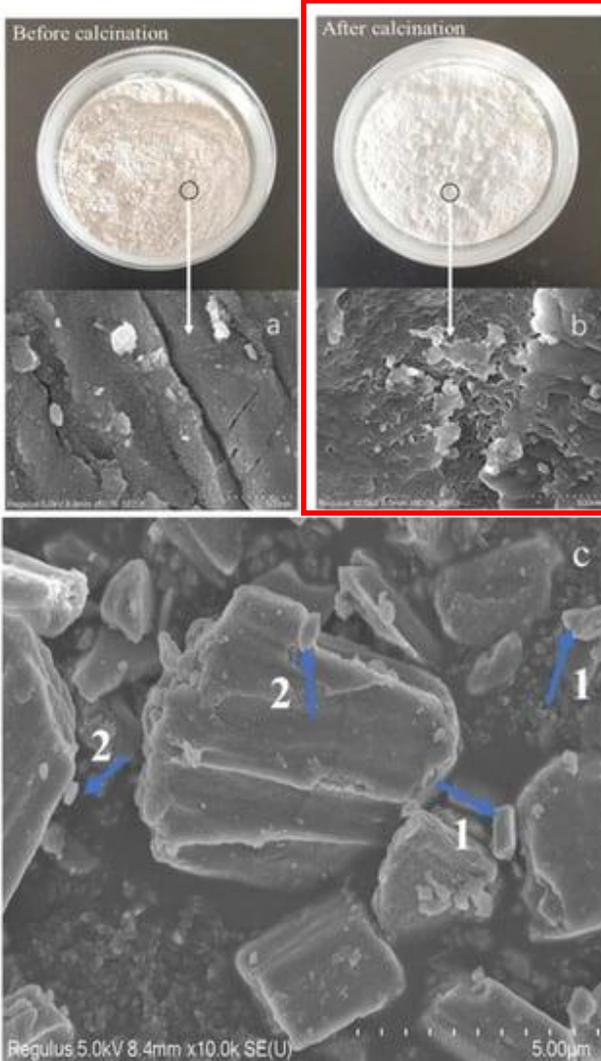
Concentrazione
metalli con ICP-OES

ALCUNI RISULTATI: TEST DI LISCIVIAZIONE



(Petti et al., in prep.)

L'USO DEI GUSCI CALCINATI NEI TRATTAMENTI CHIMICI



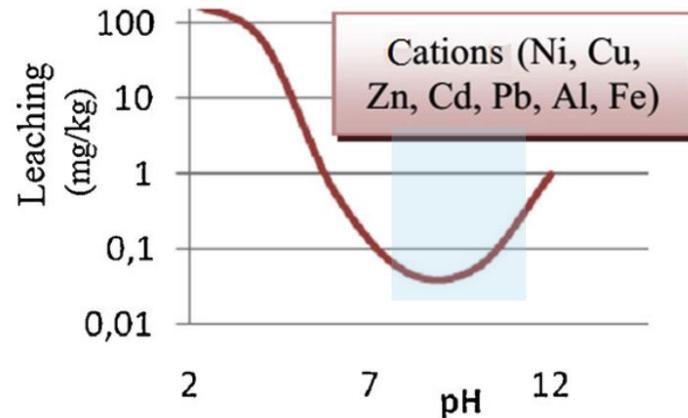
1 strutture rombiche della calcite
2 strutture lamellari dell'aragonite

Struttura calcinata porosa che permette alla polvere di agire come adsorbente chimico nel trattamento dei sedimenti contaminati

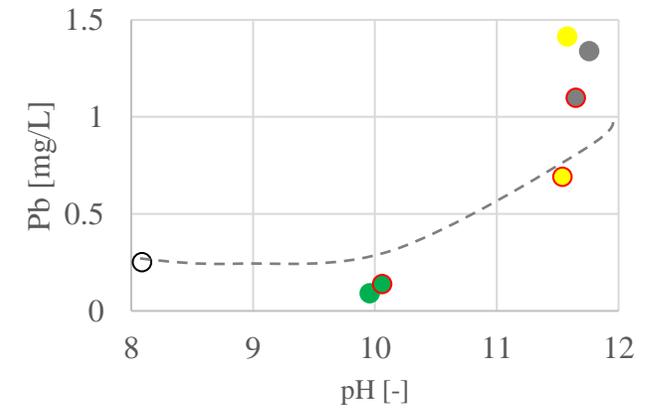
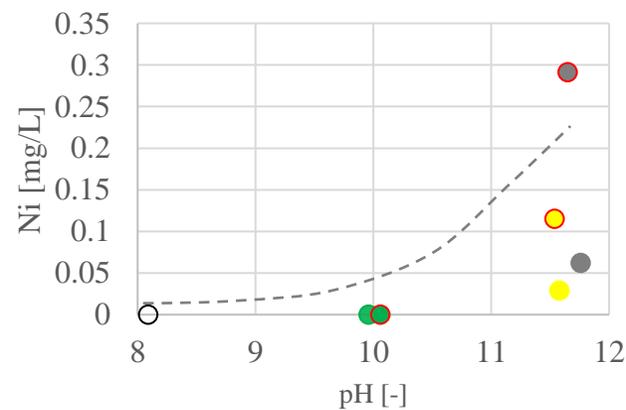
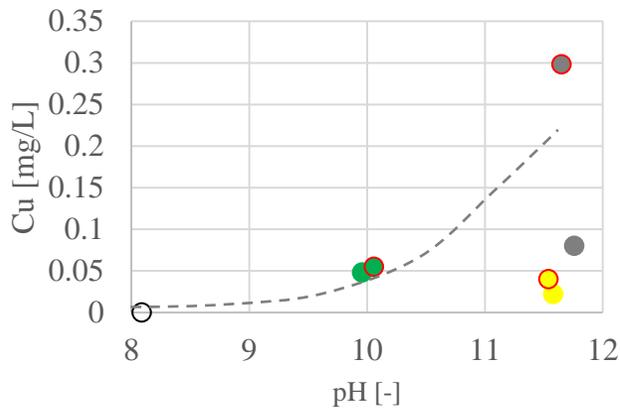
Struttura più porosa della polvere di gusci di mitili calcinata risultante dalla decomposizione termica dei carbonati

(Wang et al., 2021)

ALCUNII RISULTATI: TEST DI LISCIVIAZIONE

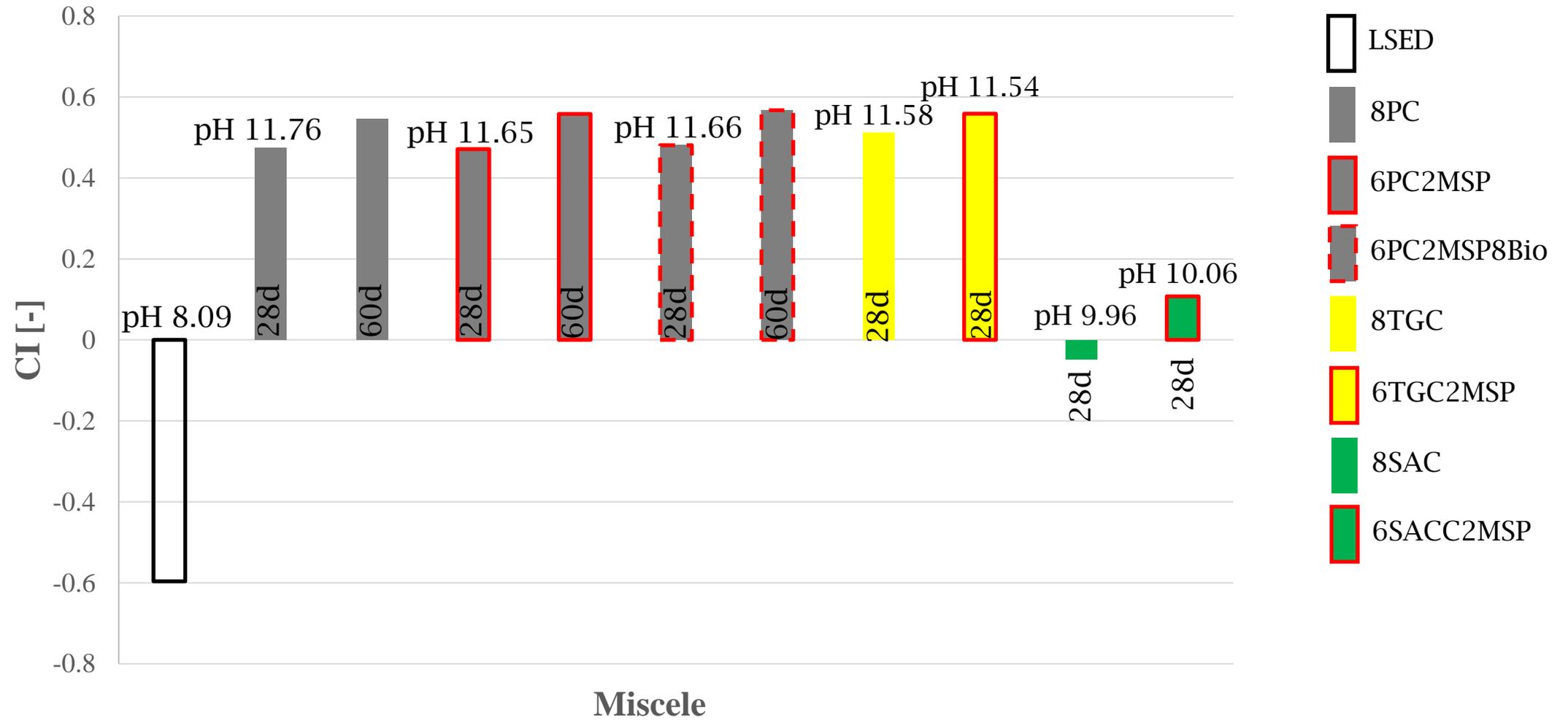


(Van der Sloot & Kosson, 2010)

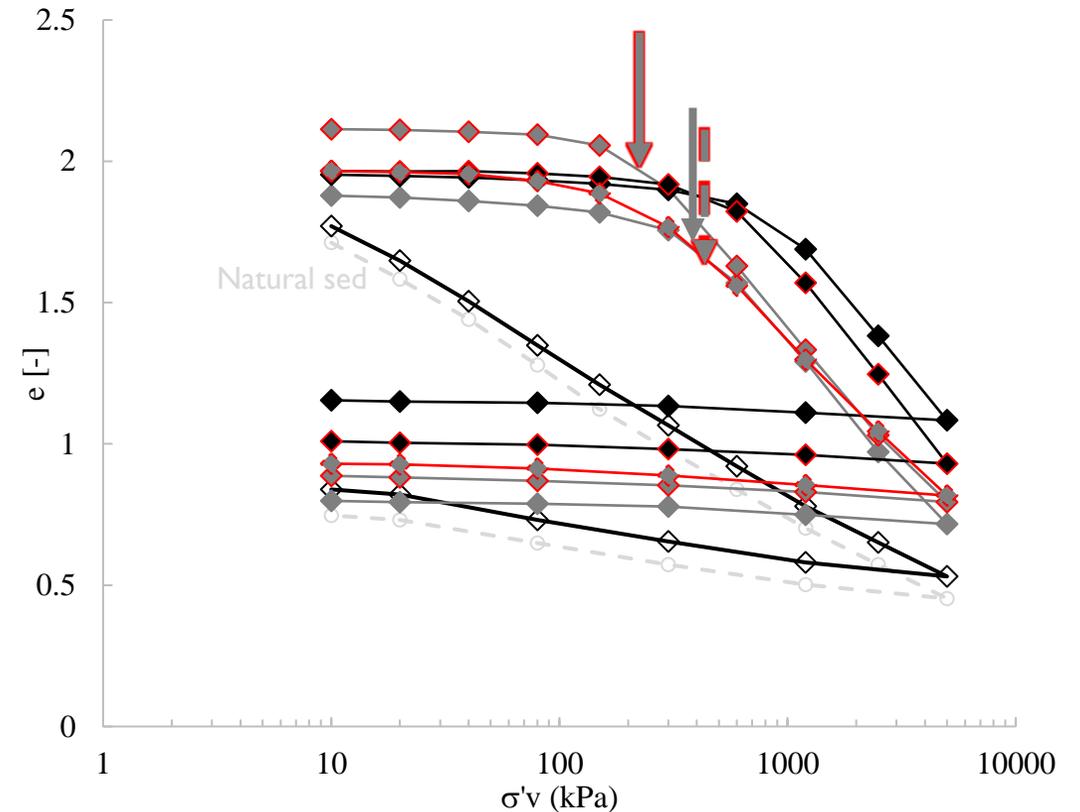
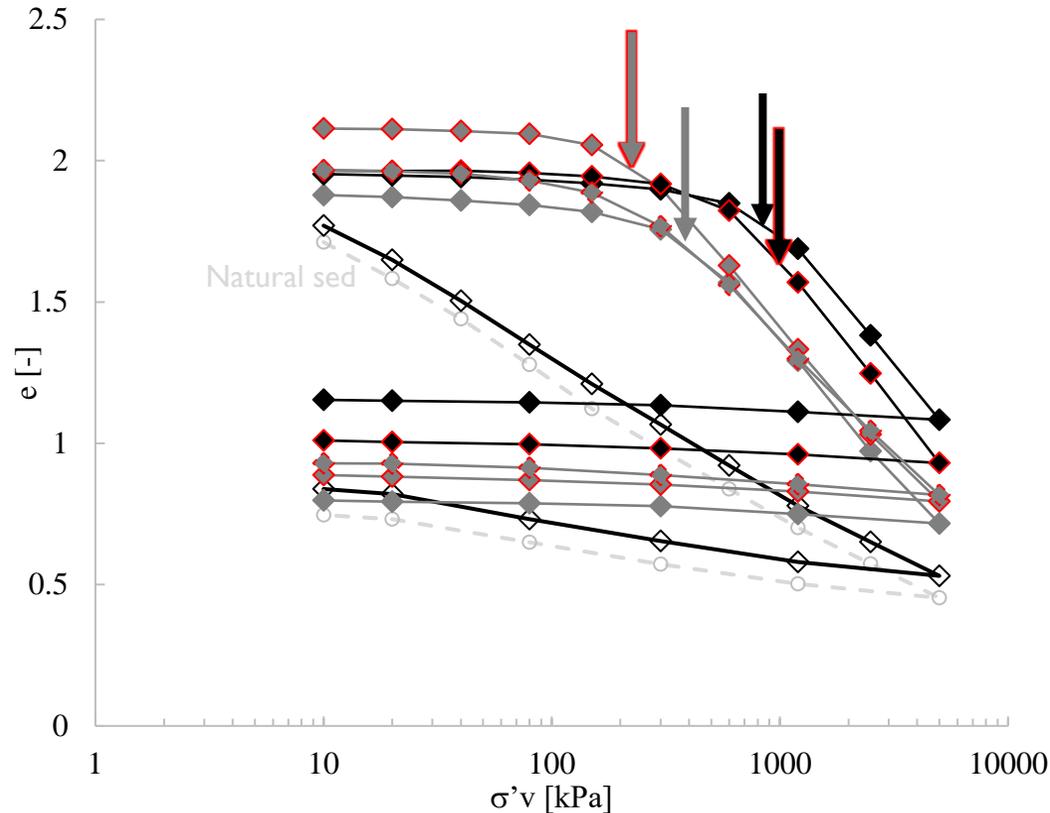


- LSED
- LSED8PC
- LSED6PC2MSP
- LSED8TGC
- LSED6TGC2MSP
- LSED8SAC
- LSED6SAC2MSP

ALCUNI RISULTATI: INDICE DI CONSISTENZA



ALCUNI RISULTATI: COMPRESSIONE MONODIMENSIONALE



STESSO RAPPORTO MSP/CEM (0.3):
La soluzione alternativa mostra buone prestazioni solo con una maggiore quantità di legante «Effetto legante»



6PC2MSF8Bio conferma il Biochar come assorbente chimico «Effetto Biochar»

CONCLUSIONI TRATTAMENTI CHEMO-MECCANICI INNOVATIVI

- Le soluzioni di stabilizzazione a base di PC e TGC e farina di mitili, applicate a sedimenti inquinati con 5000ppm di piombo, mostrano interessanti prestazioni chemo-meccaniche rispetto alle soluzioni tradizionali.
- La presenza dell'8% di Biochar nelle soluzioni a base di PC e farina di mitili fa diminuire la lisciviazione del piombo e aumenta l'indice di consistenza e la pressione di snervamento rispetto alla corrispondente soluzione tradizionale.

GRAZIE!

Niente va mai via. Ogni cosa deve finire da qualche parte. In natura non ci sono «rifiuti» e non c'è un «lontano» dove le cose possono essere gettate.

Seconda legge di Barry Commoner sull'ecologia



Post-Doc Rossella Petti
Politecnico di Bari
rossella.petti@poliba.it

INCONTRO ANNUALE DEI RICERCATORI DI GEOTECNICA ORGANIZZATO
DALL'UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CASSINO E DEL LAZIO MERIDIONALE

Scuola di dottorato GNIG in Ingegneria Geotecnica 2024

L'ingegneria geotecnica e i sedimenti marini: tra caratterizzazione, consolidamento e gestione sostenibile

Claudia Vitone, Rossella Petti, Federica Cotecchia

per saperne di più



A tra poco
per il piccolo
Laboratorio!



A tra poco per il piccolo Laboratorio!



Piccolo Laboratorio sperimentale nell'ambito della Scuola di Dottorato GNIG in Ingegneria Geotecnica

Obiettivo delle attività

Preparazione di provini di miscele di sedimenti per campagna sperimentale presso ESRF – The European Synchrotron Radiation Facility di Grenoble (Fr)

Materiali a disposizione

Sedimenti naturali dragati dal porto di Taranto (TA): w=73%; CF=30.4%

Sedimenti naturali dragati dal porto di Barletta (BT): w=59%; CF=18.7%

Acqua marina

Polvere di gusci di mitili non calcinata (MS)

Cemento Portland 52.5 R (PC)

Campionatori di silicone di diametro interno 1.0 mm, 1.5 mm, 2.0 mm

Campionatori di vetro borosilicato di diametro interno 0.3 mm

Altro materiale utile (forbicine, pellicola, burette, siringhe, bilancia, ecc).

Target sperimentale

Confezionamento di almeno 4 provini di miscele di sedimenti e additivi con contenuto di additivi pari all'8% (rispetto al peso del sedimento secco):

gnig1: BT8PC

gnig2: TA8PC

gnig3: BT6PC2MS

gnig4: TA6PC2MS