

LA STABILIZZAZIONE DEI TERRENI CON CALCE

| Interventi Relatori   | Foto Convegno ALIG - PESARO |
|---|-----------------------------|
| <p><u>Prof. GIACOMO RUSSO (Università degli Studi di Cassino)</u><br/><u><i>Effetti indotti dal trattamento a calce sulle proprietà fisiche e meccaniche terreni</i></u></p>                    |                             |
| <p><u>Prof. GABRIELE TEBALDI (Università degli Studi di Parma)</u><br/><u>Mix Design della miscela terra calce e definizione dei parametri di riferimento per il controllo qualità</u></p>      |                             |
| <p>Prof. PAOLO CROCE Università degli Studi di Cassino<br/>Progettazione e verifiche geotecniche di costruzioni di terra stabilizzata a calce</p>   |                             |
| <p><u>Dott. UGO SERGIO ORAZI (LABORATORIO GEOMECCANICO ORAZI)</u><br/><u><i>Prove geotecniche di laboratorio ed in sito: dallo studio preliminare della miscela ai controlli finali</i></u></p> |                             |
| <p><u>Dott. VITTORIO MISANO (ISTITUTO SPERIMENTALE RFI SPA)</u><br/><u><i>La nuova specifica tecnica di RFI per il trattamento a calce dei terreni</i></u></p>                                  |                             |
| <p><u>Geom. UMBERTO PRESSATO, Ing. ANGELO CANZIANI (UNICALCE)</u><br/><u><i>Gestione e pratica dei cantieri: schemi di Lavorazione, attrezzature, logistica, costi e produzione</i></u></p>     |                             |







CONVEGNO ALIG  
STABILIZZAZIONE DEI TERRENI CON CALCE  
PESARO, 29 APRILE 2011

## EFFETTI INDOTTI DAL TRATTAMENTO A CALCE SULLE PROPRIETA' FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI

GIACOMO RUSSO



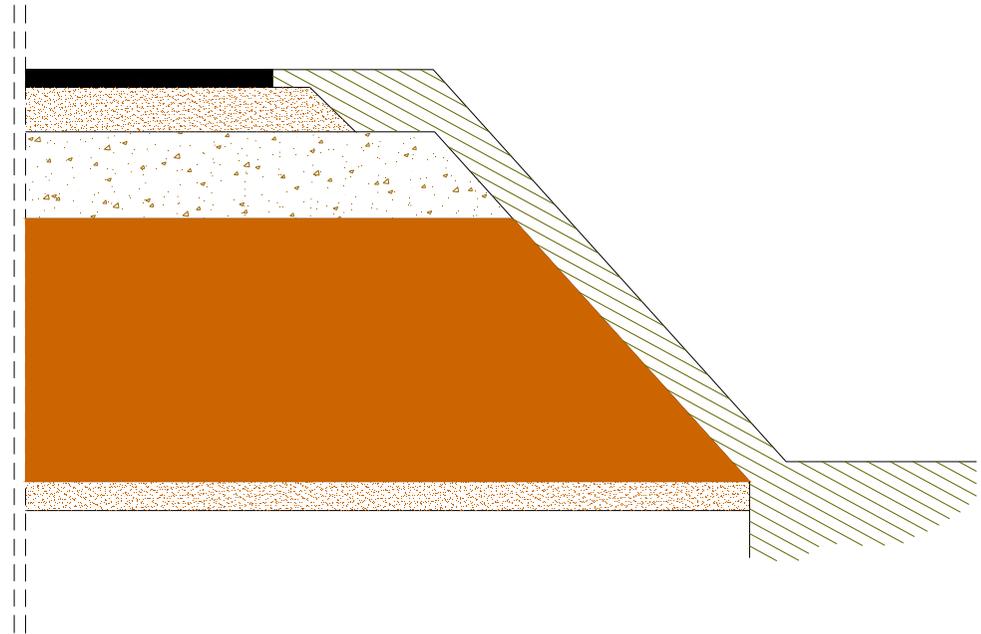
Facoltà di Ingegneria - Università di Cassino  
Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio



# STABILIZZAZIONE A CALCE

---

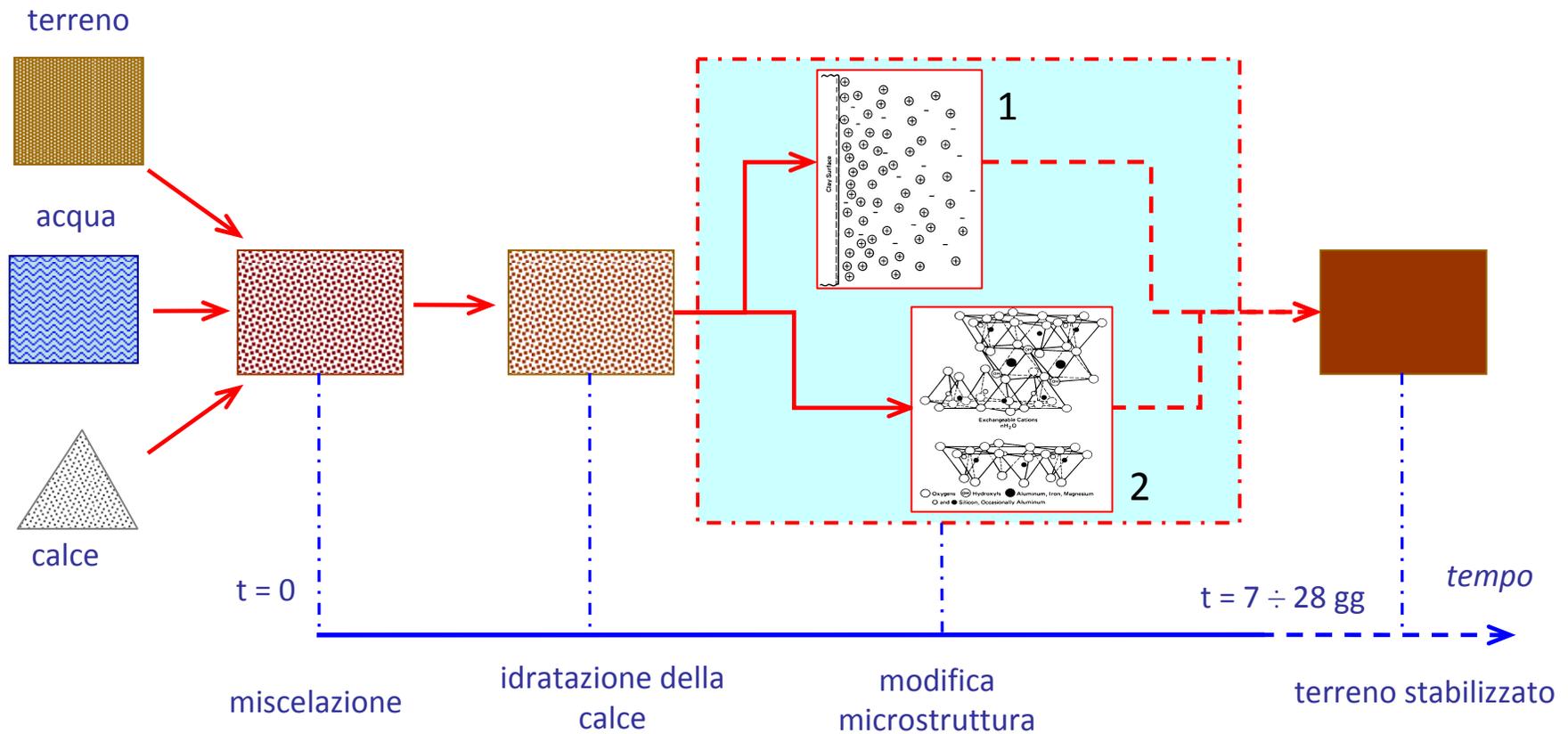
- realizzazione di sottofondi stradali
- bonifica dei terreni alla base dei rilevati
- formazione del corpo dei rilevati



- consolidamento dei terreni (deep-mixing, lime columns, ...)
- bonifica siti inquinati



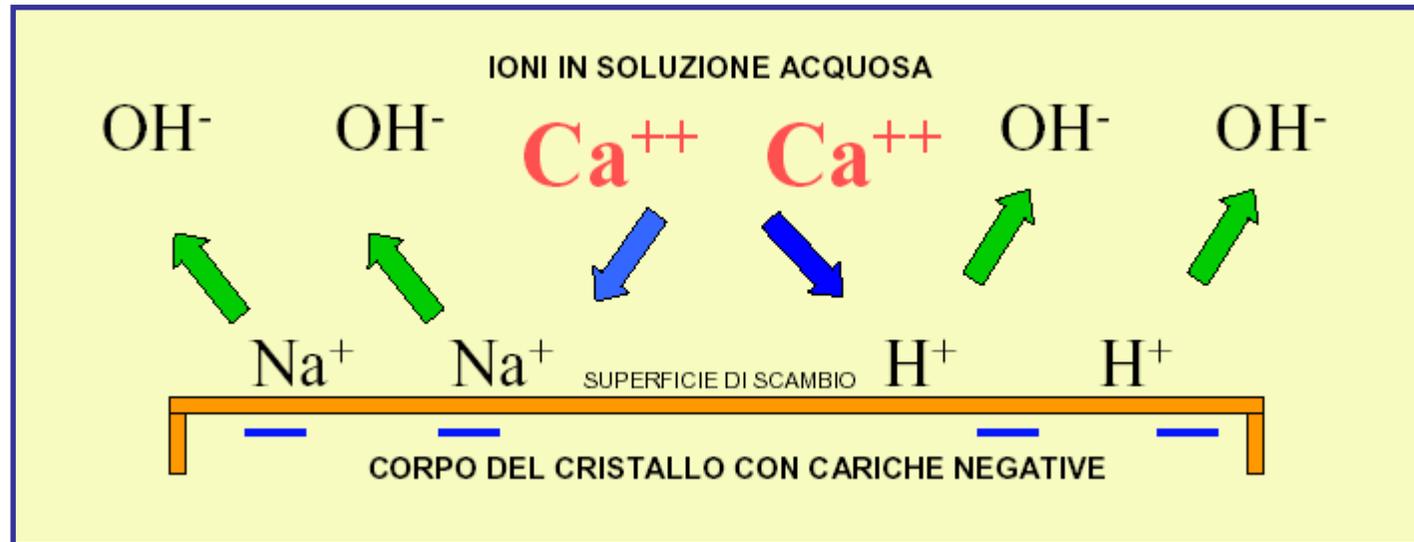
# STABILIZZAZIONE A CALCE



- 1. scambio ionico
- 2. reazioni pozzolaniche



# SCAMBIO IONICO

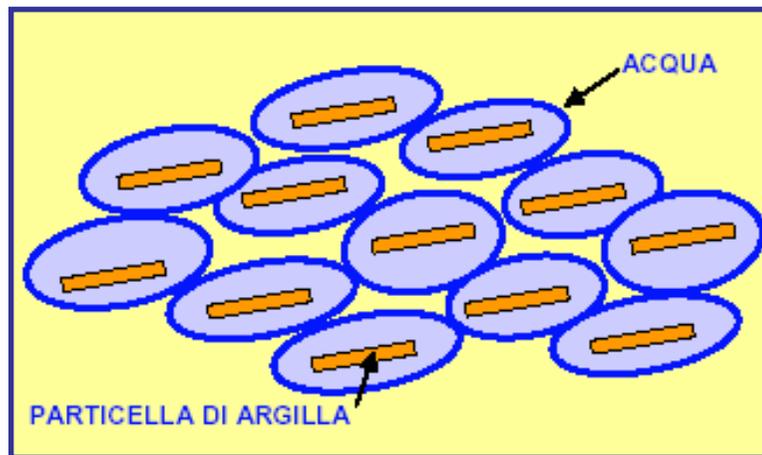


Gli ioni calcio ( $\text{Ca}^{++}$ ) in soluzione acquosa sostituiscono gli ioni ( $\text{H}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ) presenti sulla superficie del minerale argilloso

La concentrazione di ioni  $\text{OH}^-$  rende la soluzione fortemente alcalina (pH 12,4)



# SCAMBIO IONICO



struttura dispersa

calce



struttura flocculata



# REAZIONI POZZOLANICHE

---

L'ambiente fortemente alcalino favorisce la dissoluzione di silicio ed alluminio presente nei minerali argillosi

La reazione con gli ioni  $\text{Ca}^{++}$  causa la formazione dei calcio-alluminati idrati (CAH) e i calcio-silicati idrati (CSH) responsabili dei legami di cementazione fra gli aggregati

L' "attività pozzolanica" dipende da:

- contenuto di  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$

per le pozzolane naturali  $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3 > 70\%$

- percentuale di composti allo stato amorfo

nelle pozzolane naturali i composti sono allo stato amorfo

nelle argille silice ed allumina si rinvengono in forma di cristalli

- percentuale di frazione fina



# EFFETTI DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

---

**Natura e stato fisico del terreno non trattato**

**Scambio ionico + reazioni pozzolaniche**



**EFFICACIA**



- Modifica della distribuzione granulometrica
- Riduzione della plasticità
- Modifica delle caratteristiche di compattamento
- Riduzione della compressibilità
- Aumento della resistenza al taglio

**Parametri di trattamento**



**EFFICIENZA**



- Tipo di calce
- Percentuale in peso di calce
- Energia di compattamento
- Contenuto d'acqua al compattamento
- Tempo di maturazione



# EFFETTI DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

---

- EFFICACIA
- EFFICIENZA
- DURABILITA'



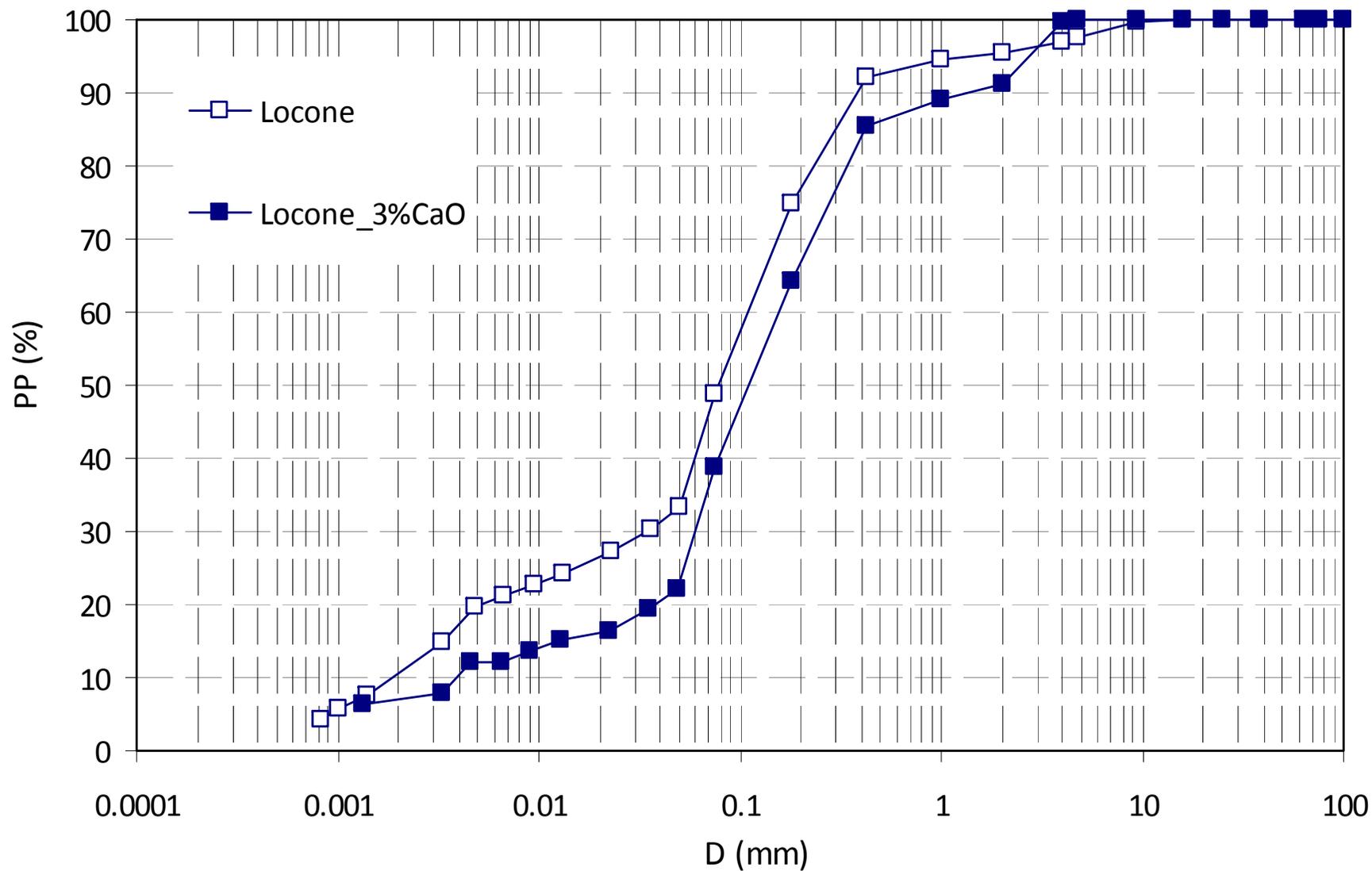
# EFFETTI DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

## TERRENI OGGETTO DI SPERIMENTAZIONE

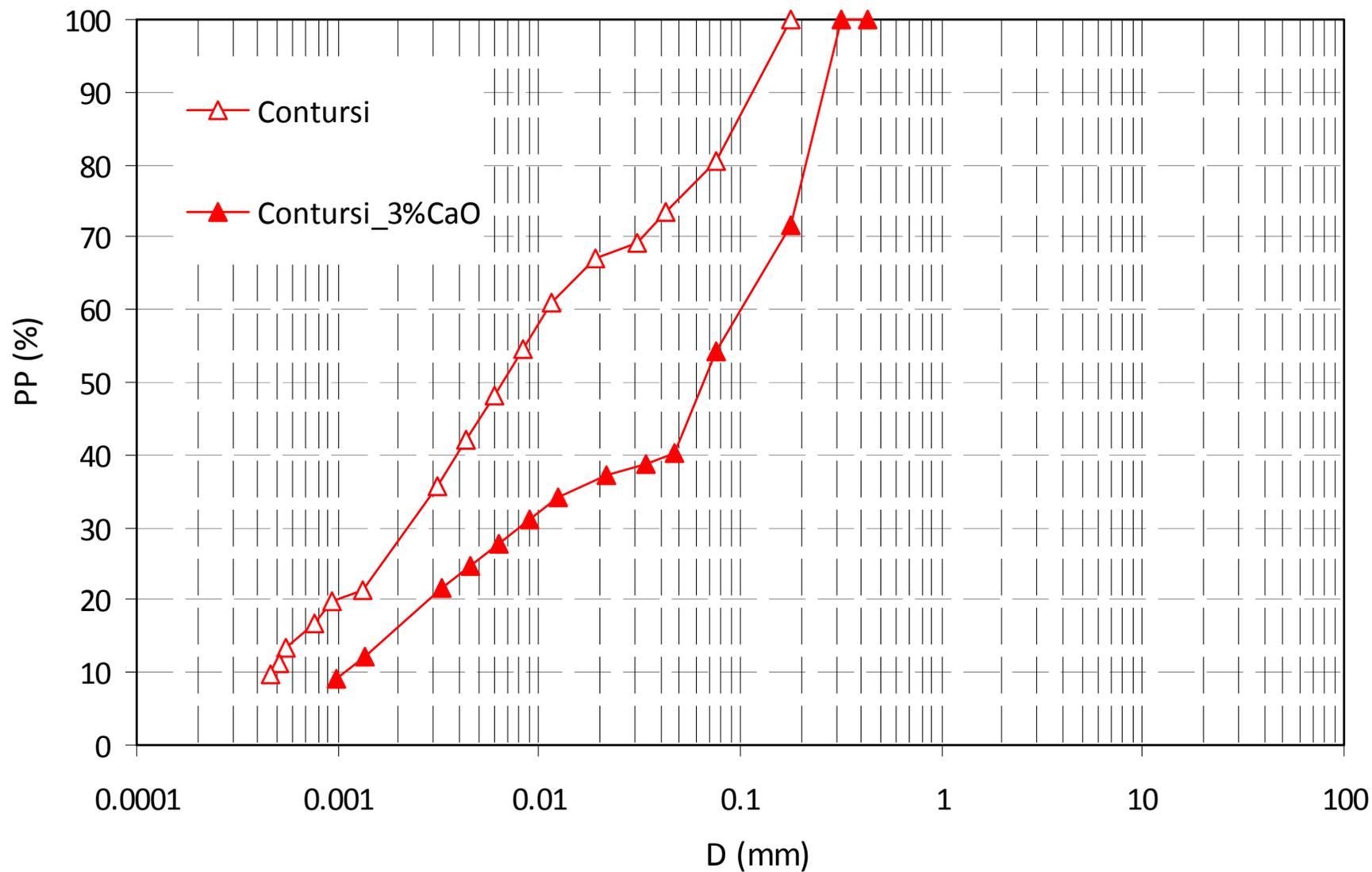
|            |                                  |
|------------|----------------------------------|
| Poggiolino | argilla a struttura complessa    |
| Contursi   | argilla a struttura complessa    |
| Benevento  | argilla natura alluvionale       |
| Locone     | limo sabbioso natura alluvionale |
| Monteforte | piroclastite                     |
| Roma       | piroclastite                     |



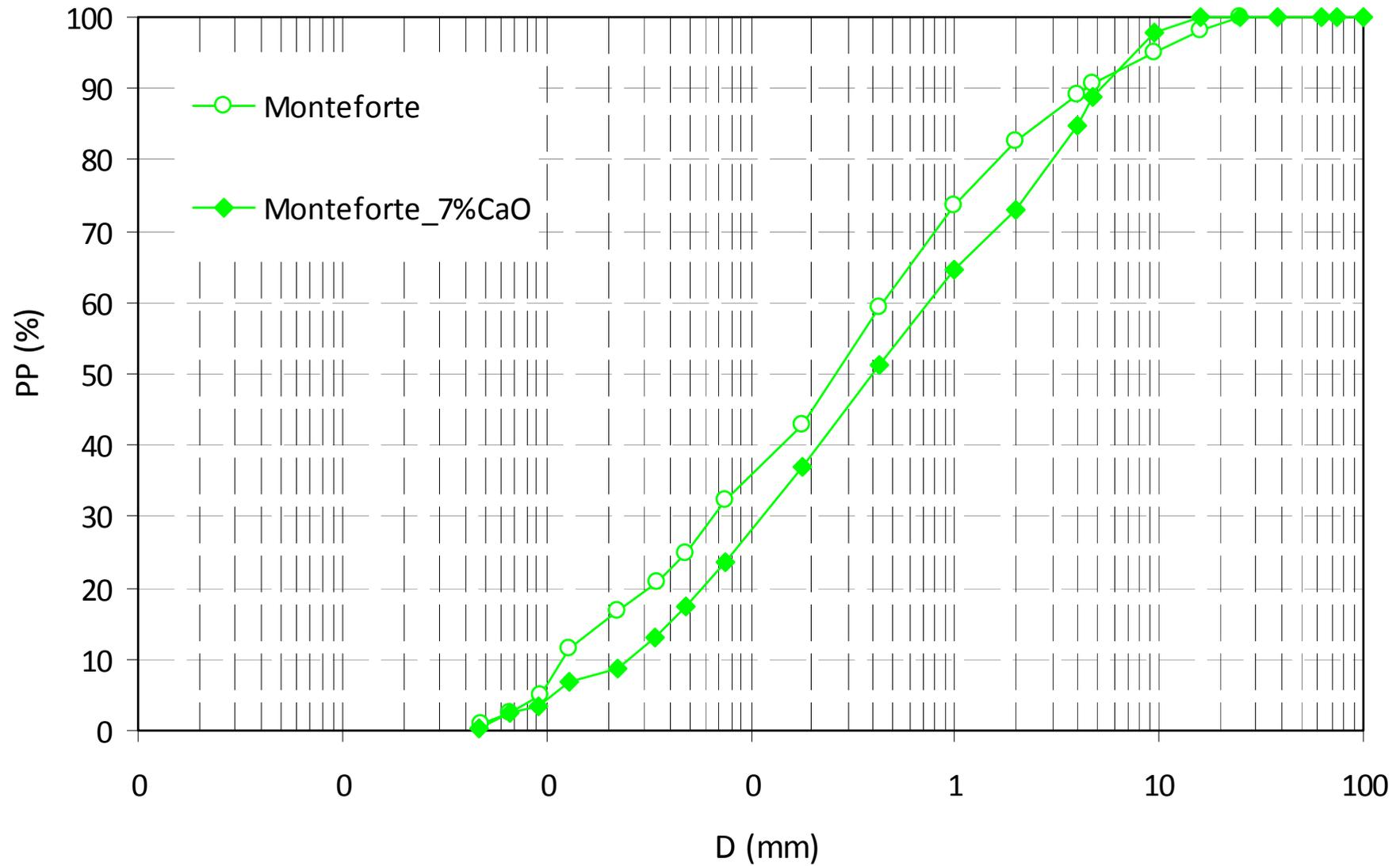
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



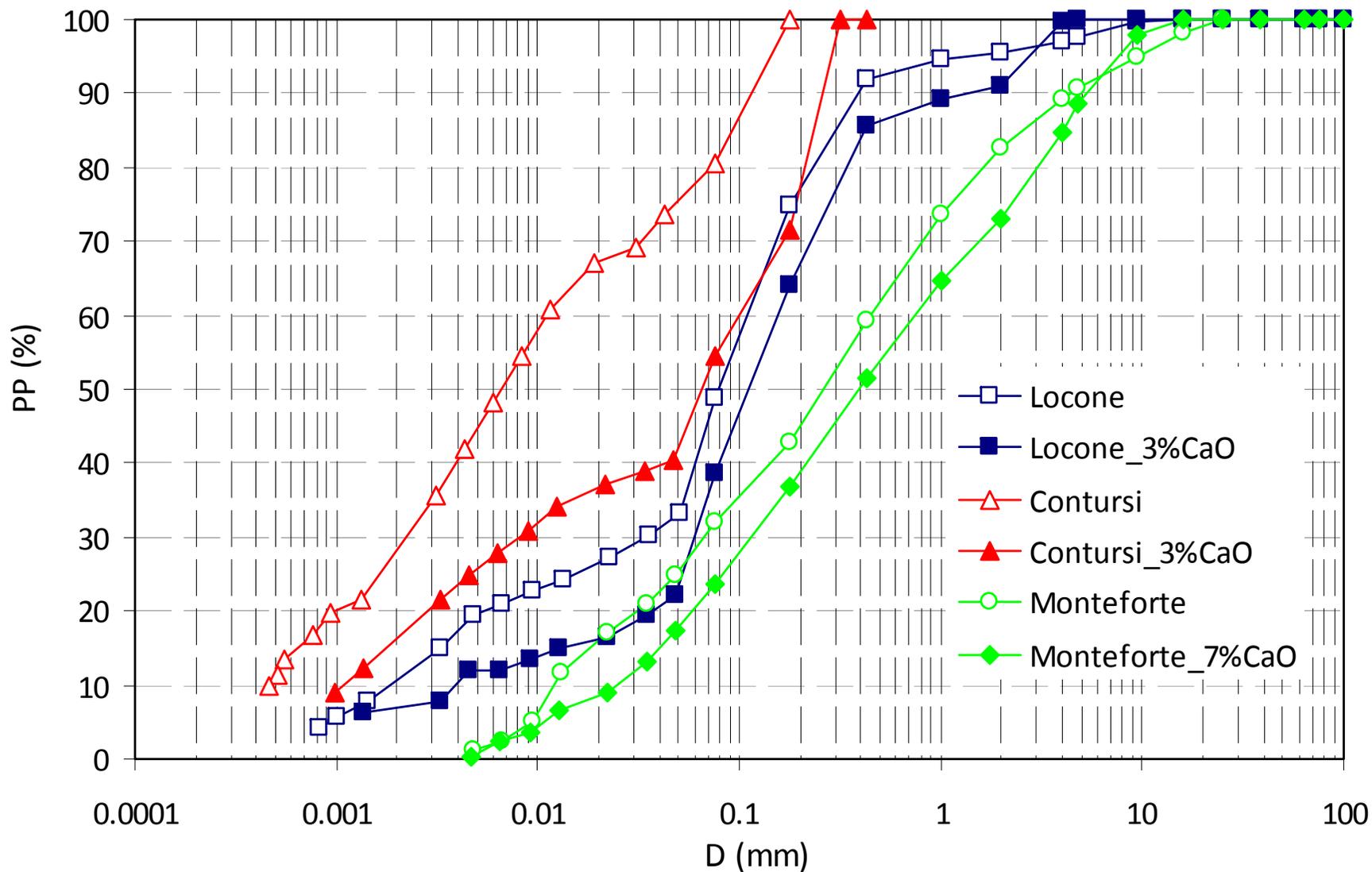
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



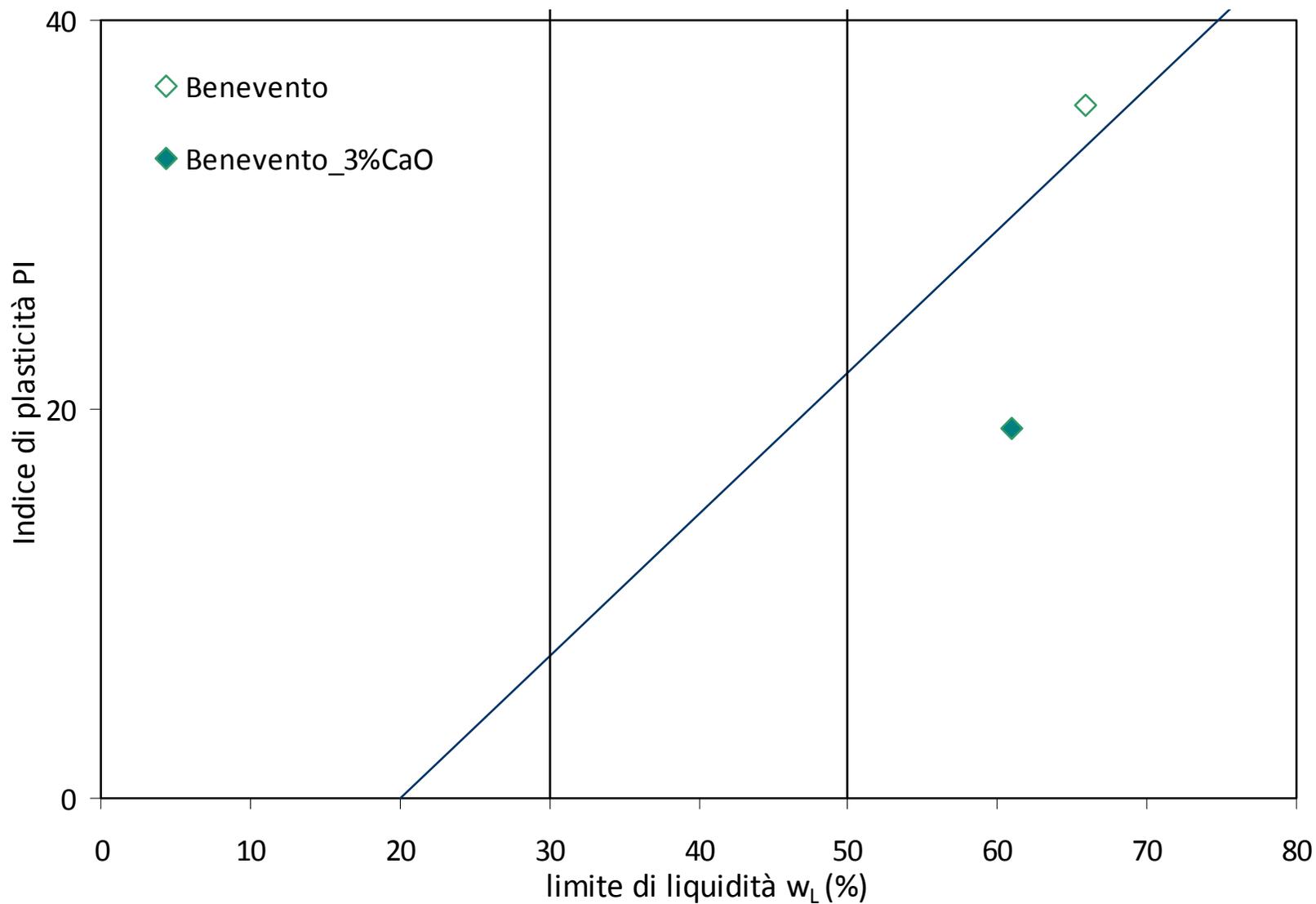
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



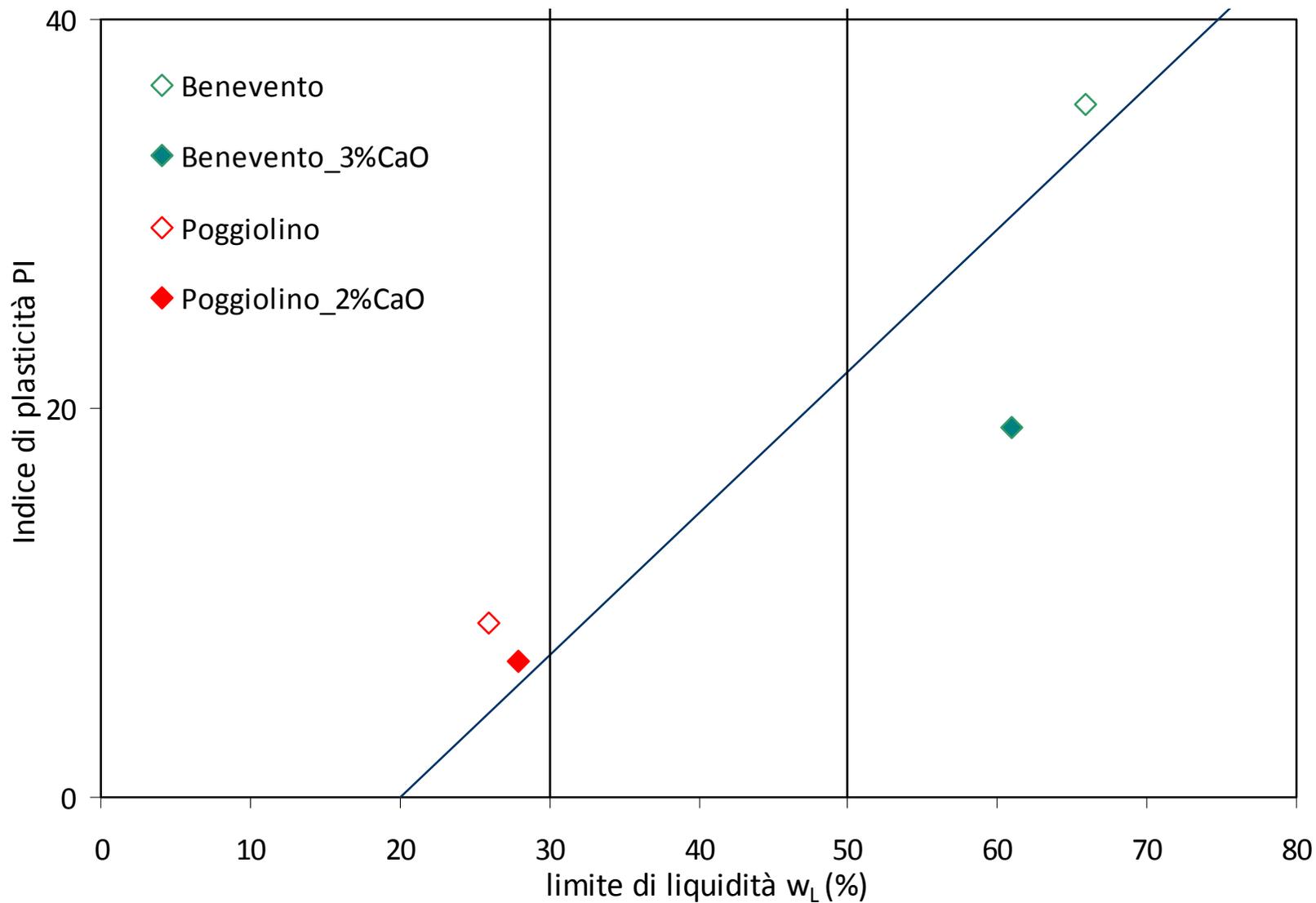
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



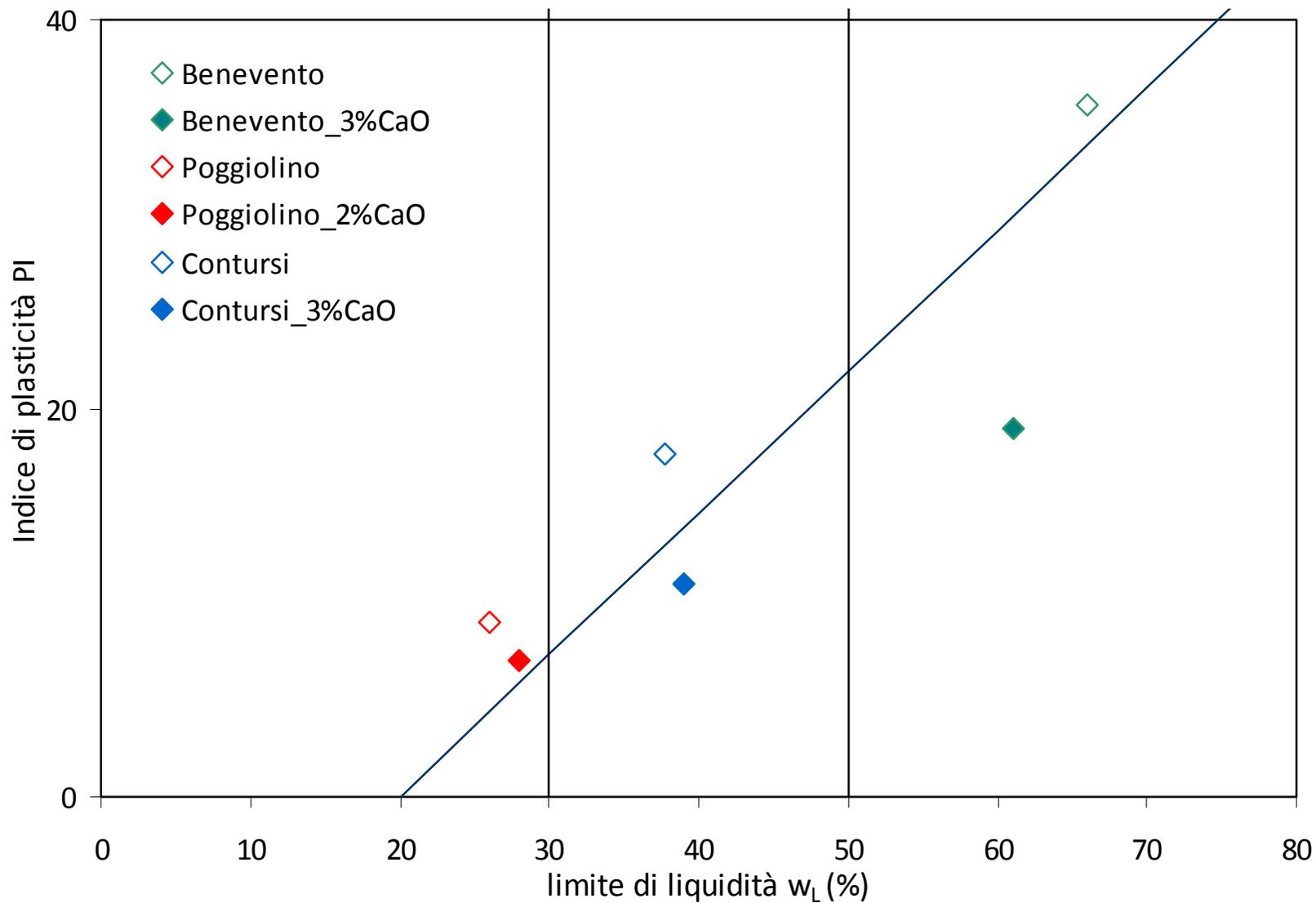
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



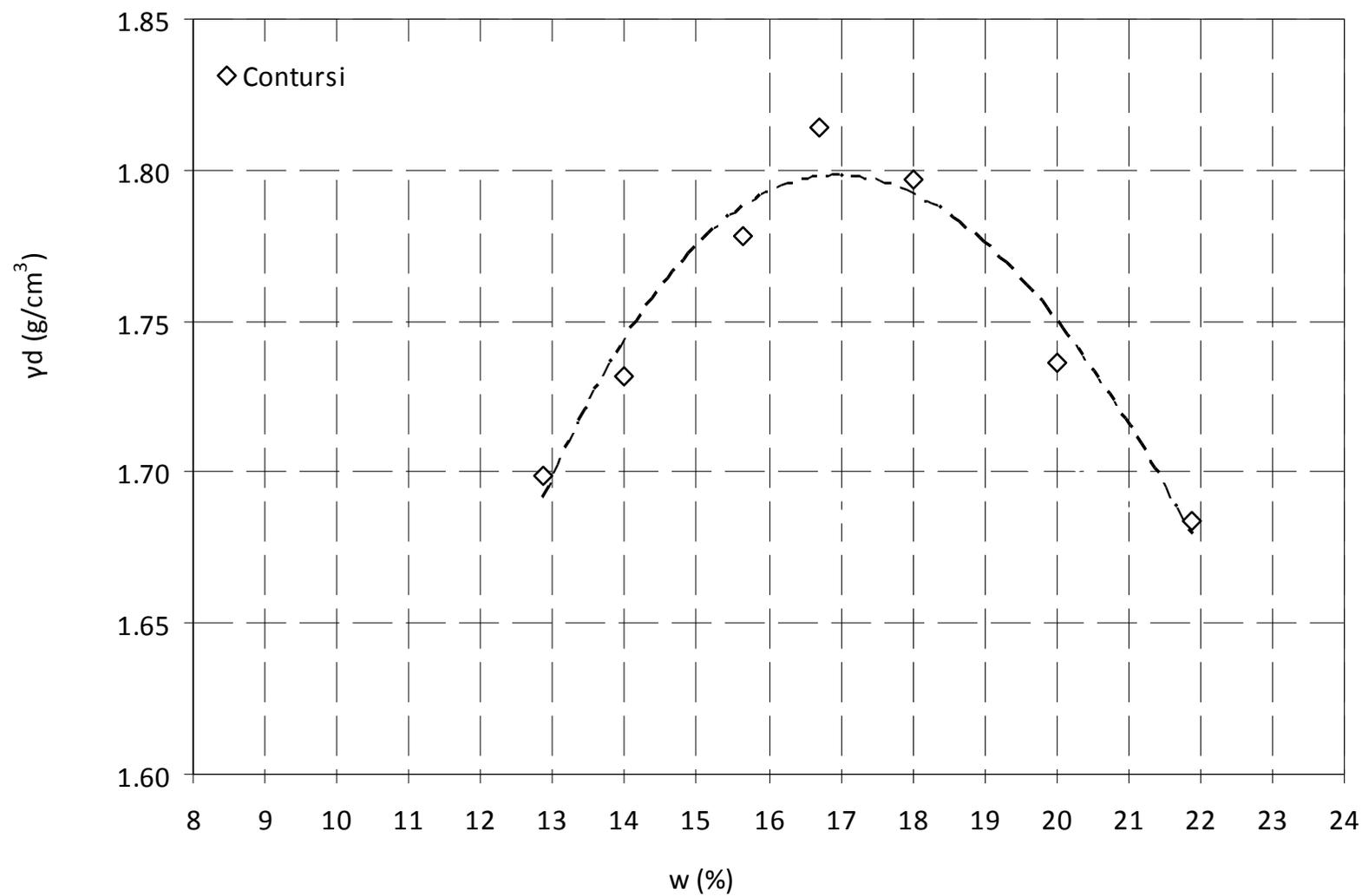
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



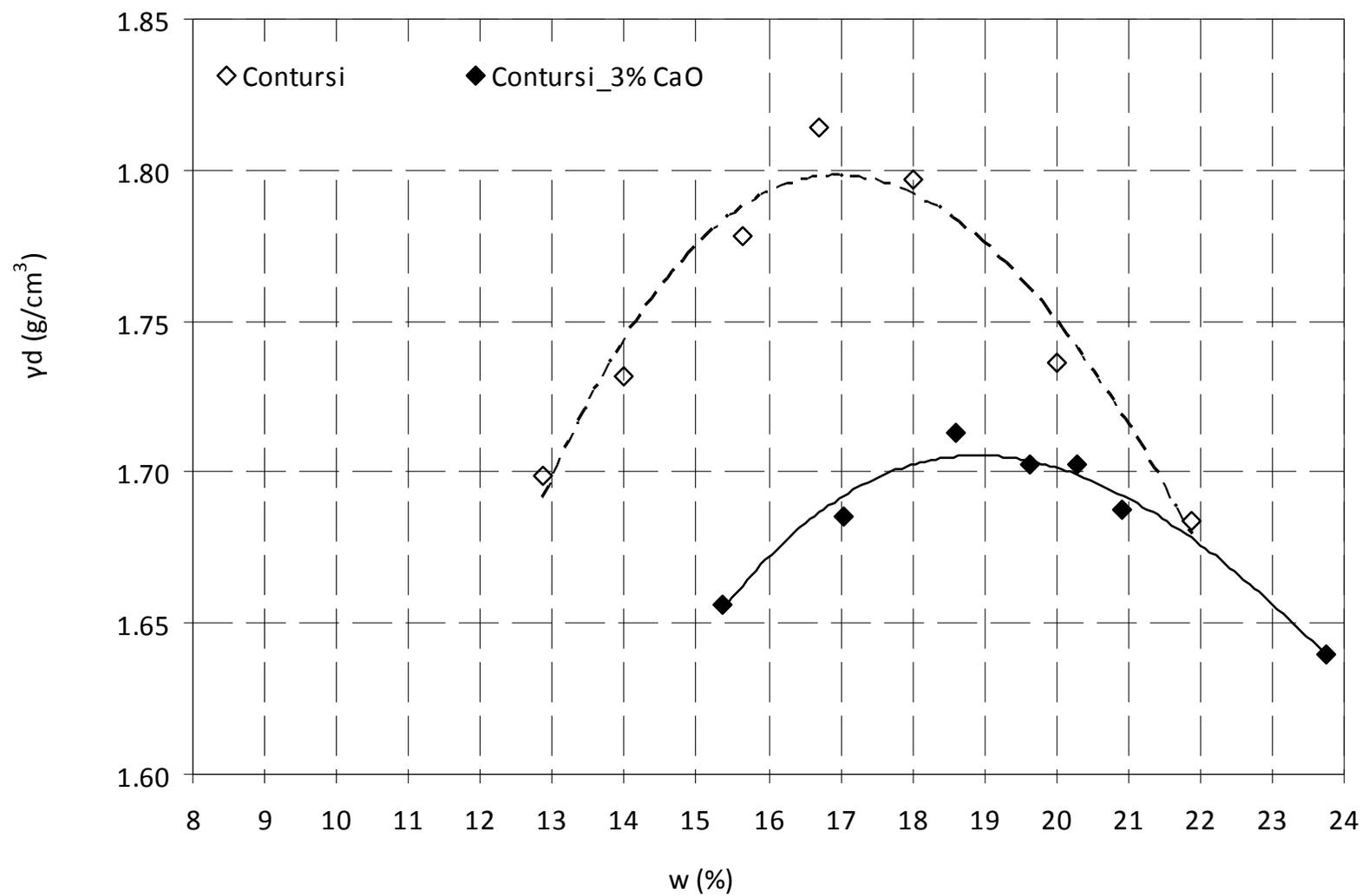
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



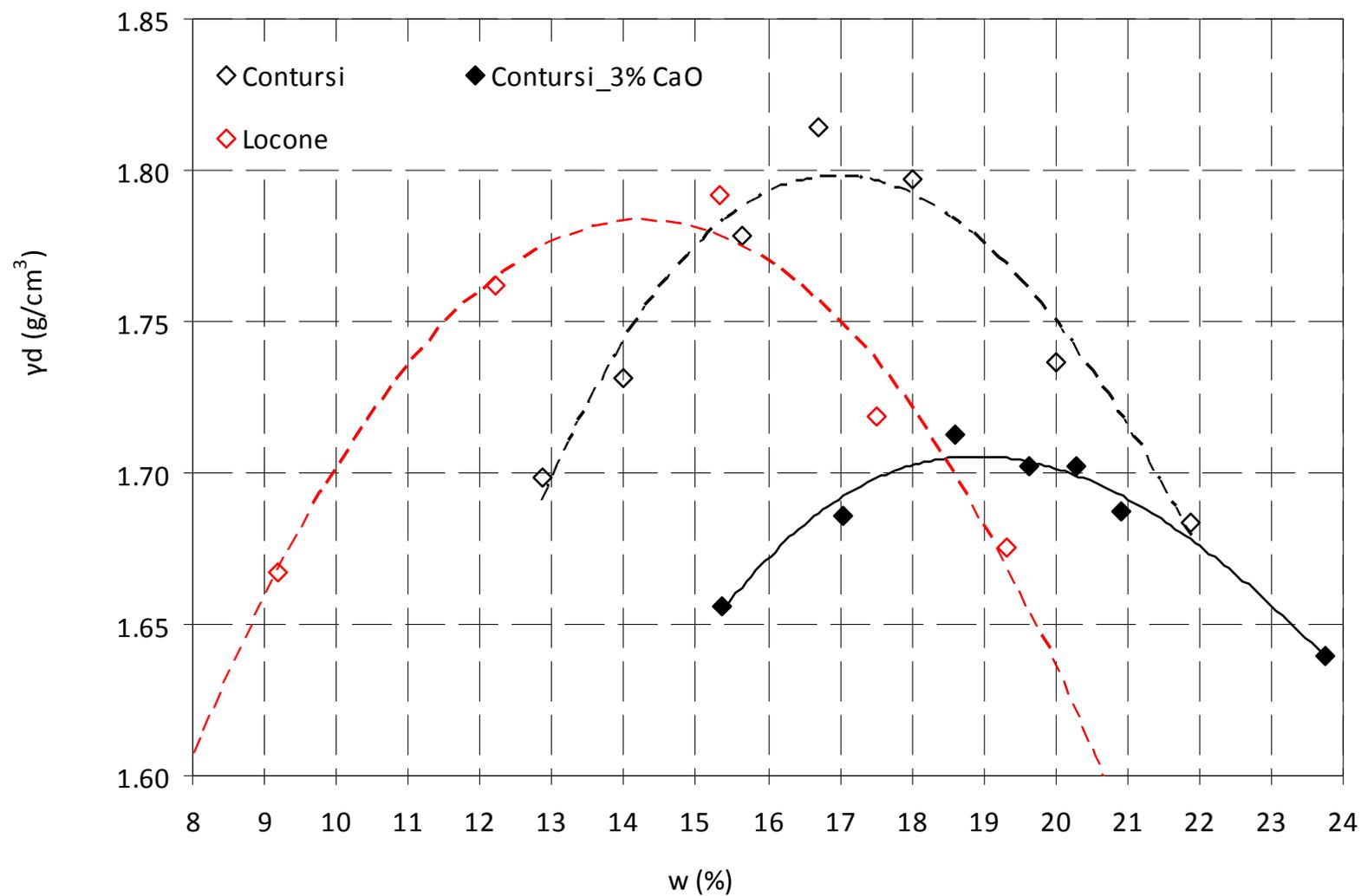
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



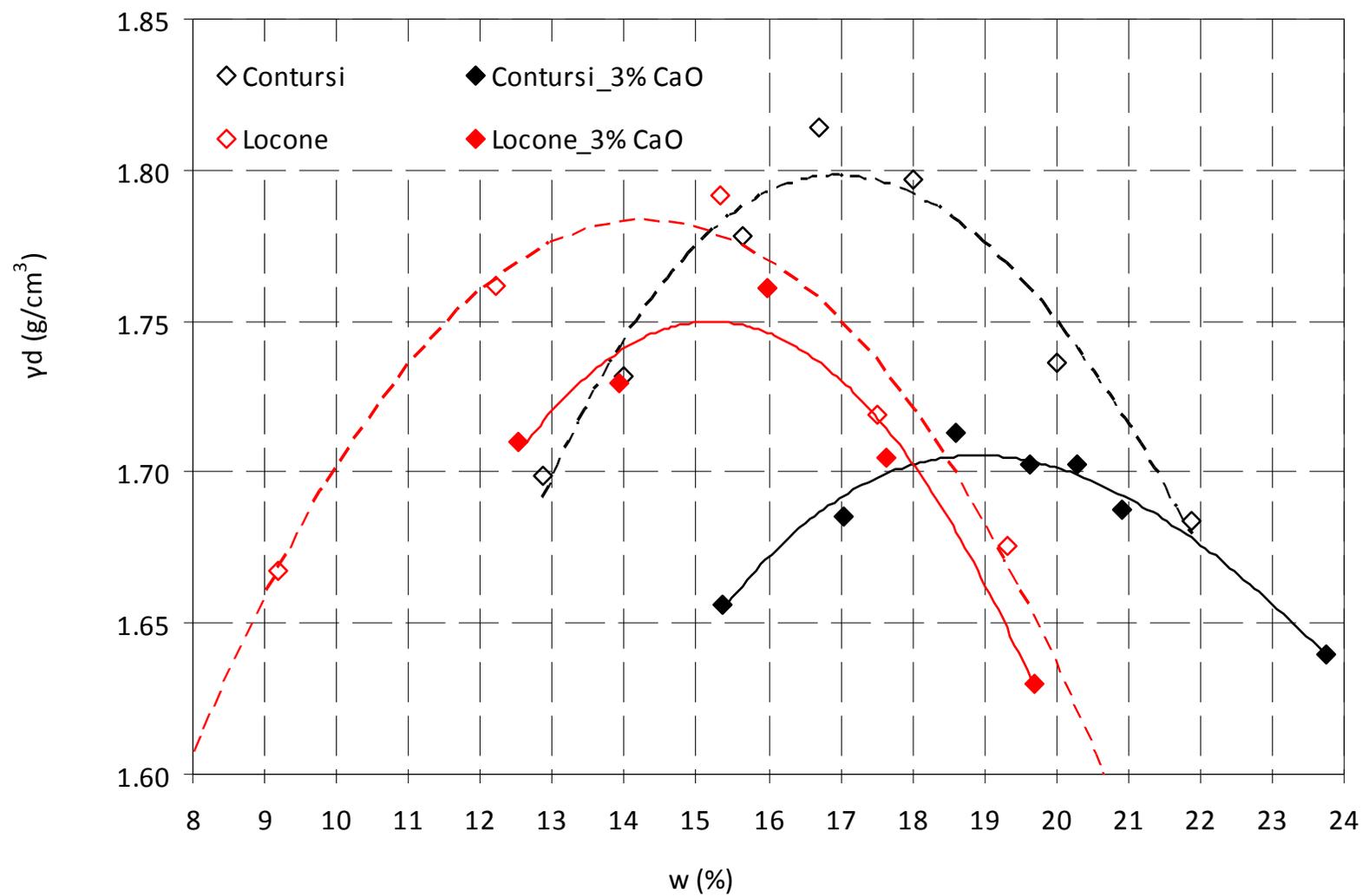
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



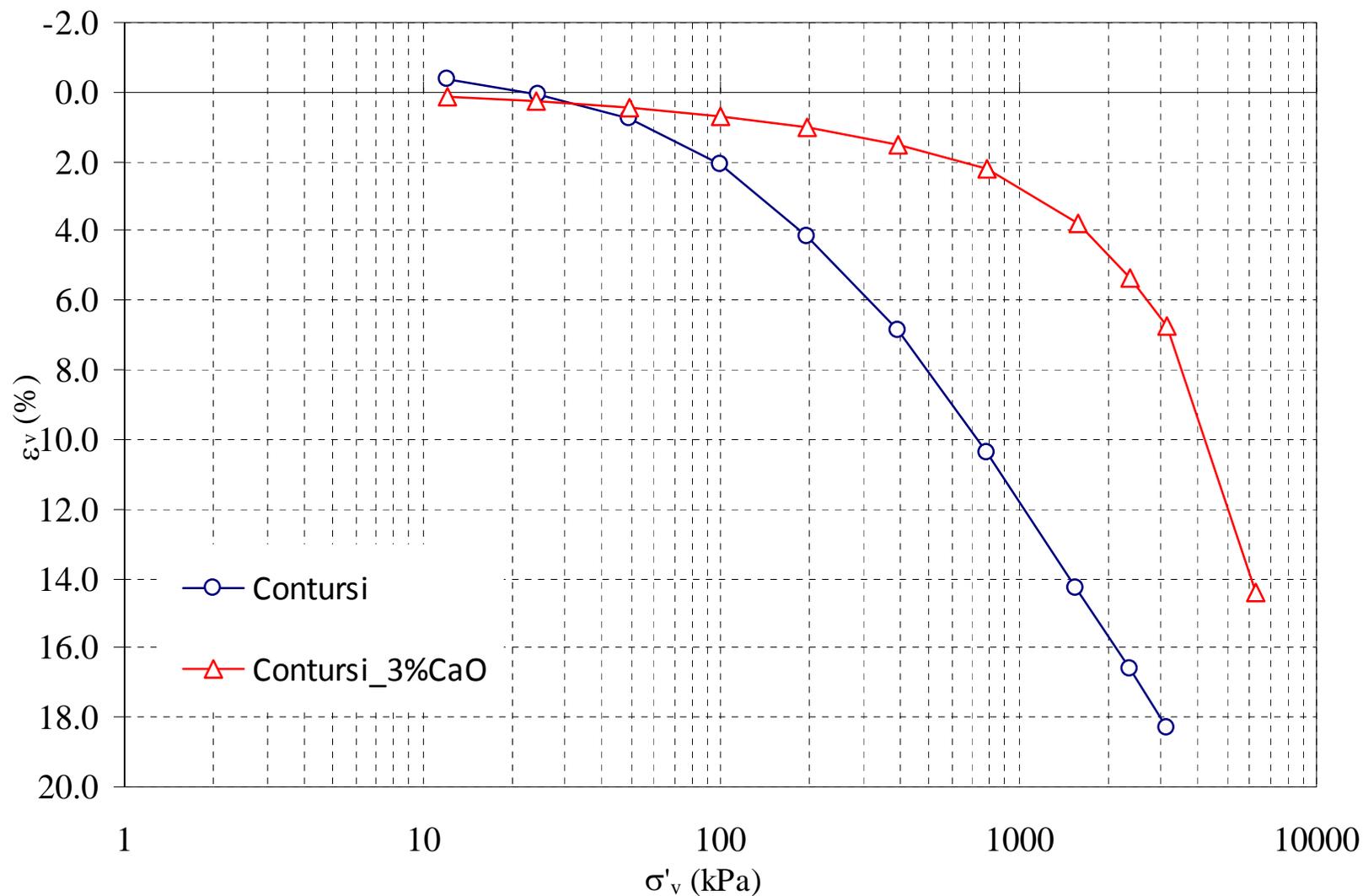
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



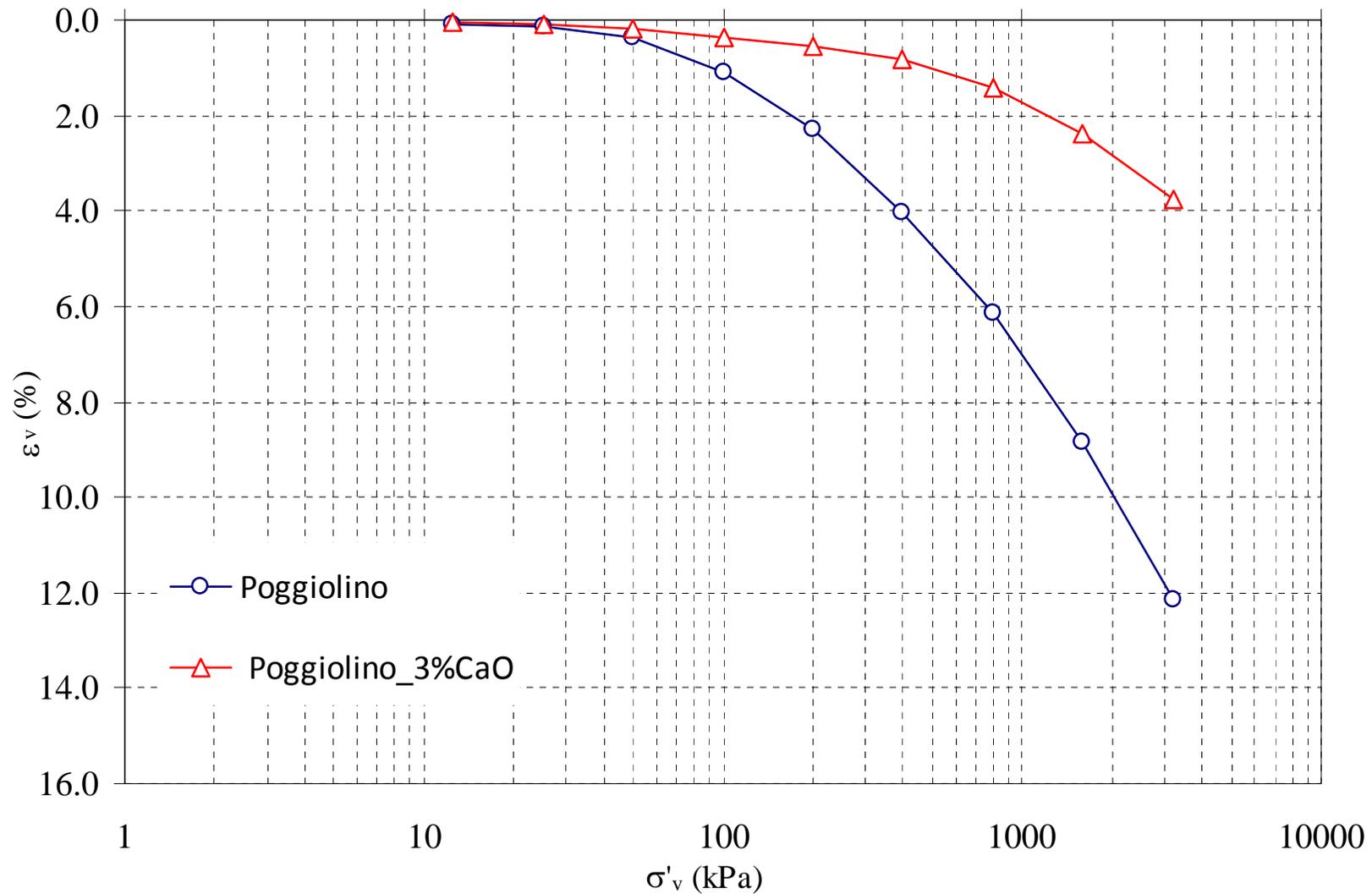
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Argilla a struttura complessa di Contursi – compattata a  $w_{dry}$



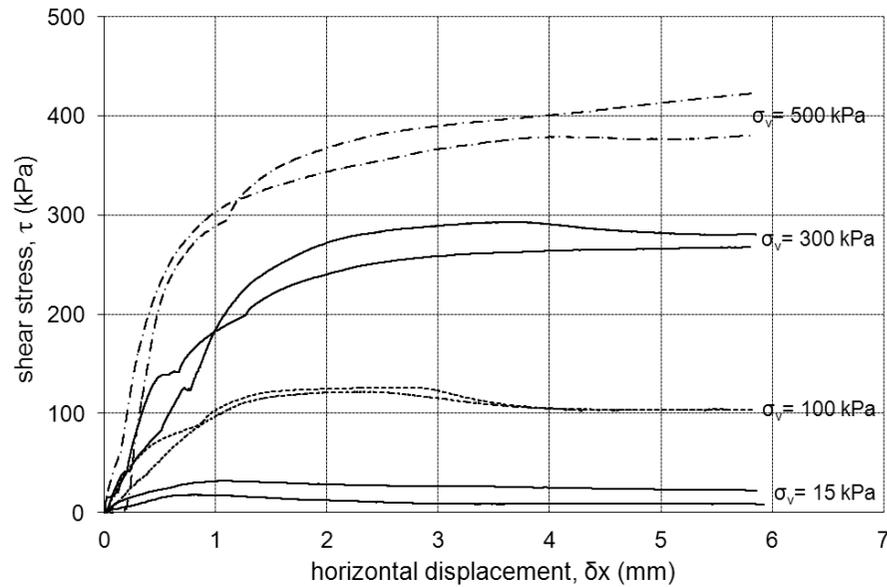
# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



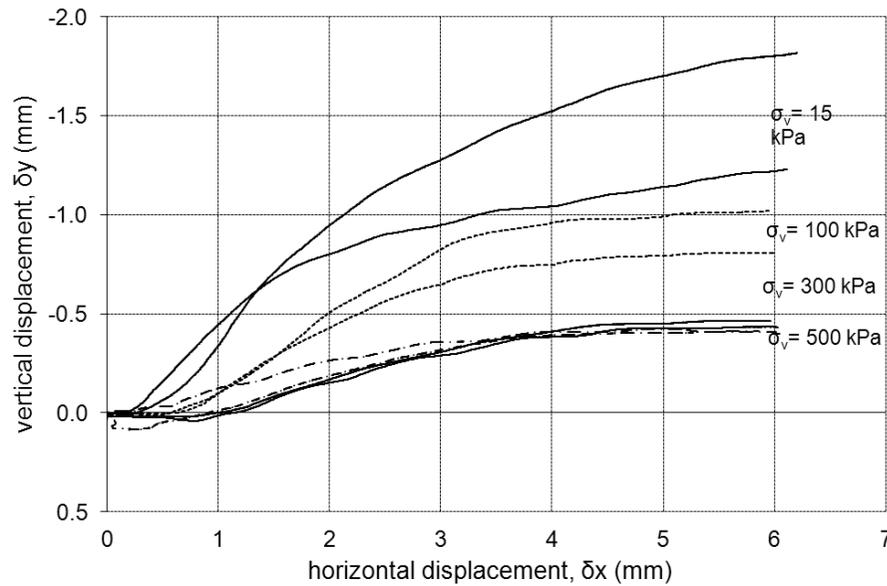
Argilla a struttura complessa di Poggiolino – compattata a  $w_{opt}$



# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Pozzolana Nera

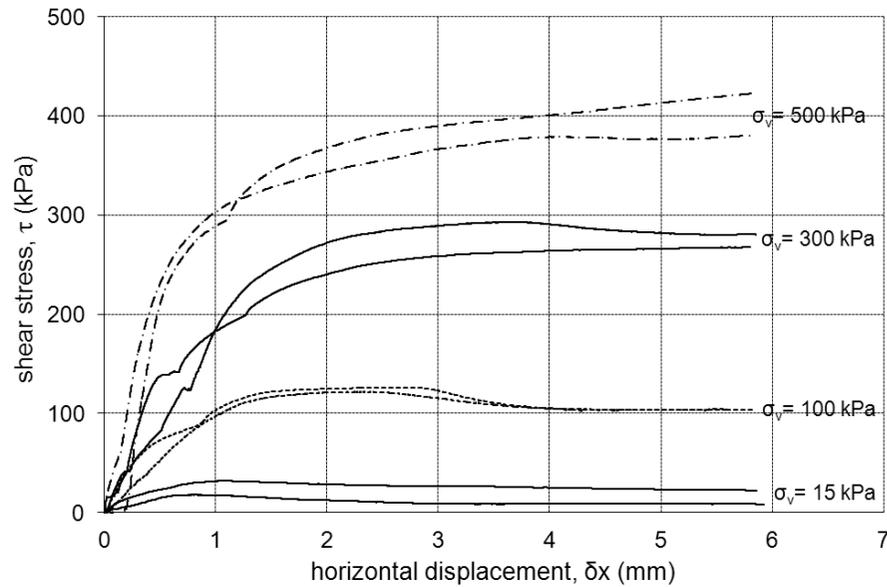


IS-SEOUL 2011  
Fifth International Symposium on  
Deformation Characteristics of  
Geomaterials

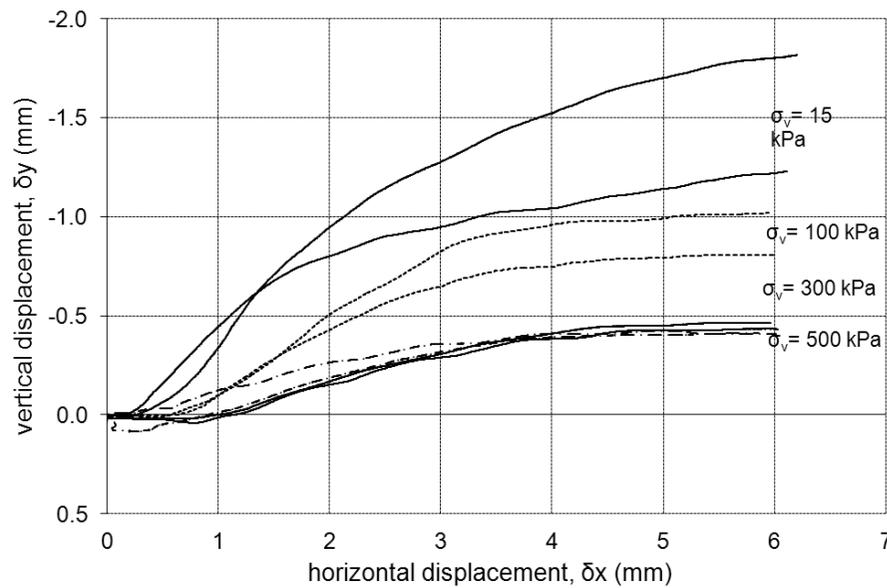
Cecconi, M., Ferretti A., Russo G. Capotosto A.,  
(2011). *Mechanical properties of two lime  
stabilised pyroclastic soils*. IS-Seoul 2011



# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Pozzolana Nera

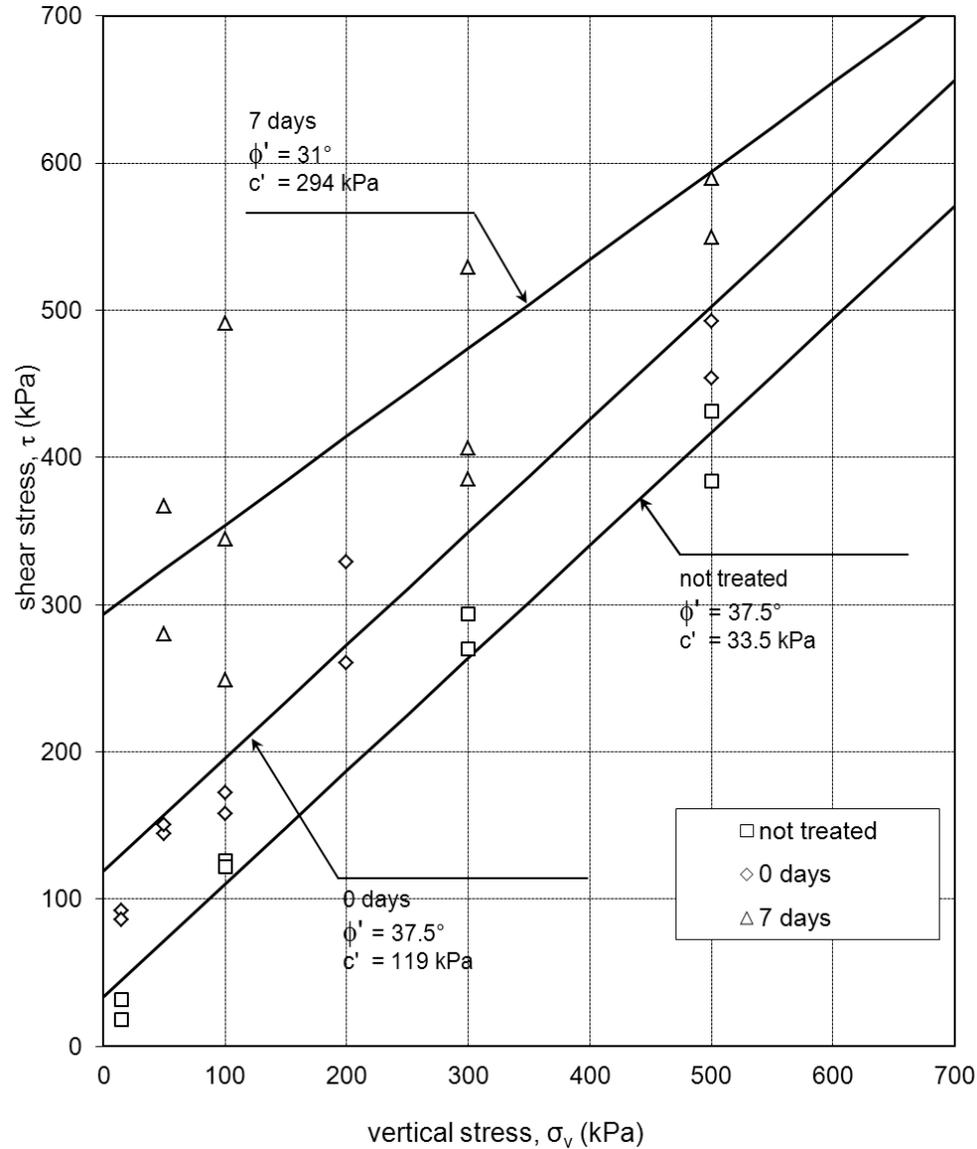


IS-SEOUL 2011  
Fifth International Symposium on  
Deformation Characteristics of  
Geomaterials

Cecconi, M., Ferretti A., Russo G. Capotosto A.,  
(2011). *Mechanical properties of two lime  
stabilised pyroclastic soils*. IS-Seoul 2011



# EFFICACIA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Pozzolana Nera

IS-SEOUL 2011  
 Fifth International Symposium on  
 Deformation Characteristics of  
 Geomaterials

Cecconi, M., Ferretti A., Russo G. Capotosto A.,  
 (2011). *Mechanical properties of two lime  
 stabilised pyroclastic soils*. IS-Seoul 2011



# EFFETTI DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

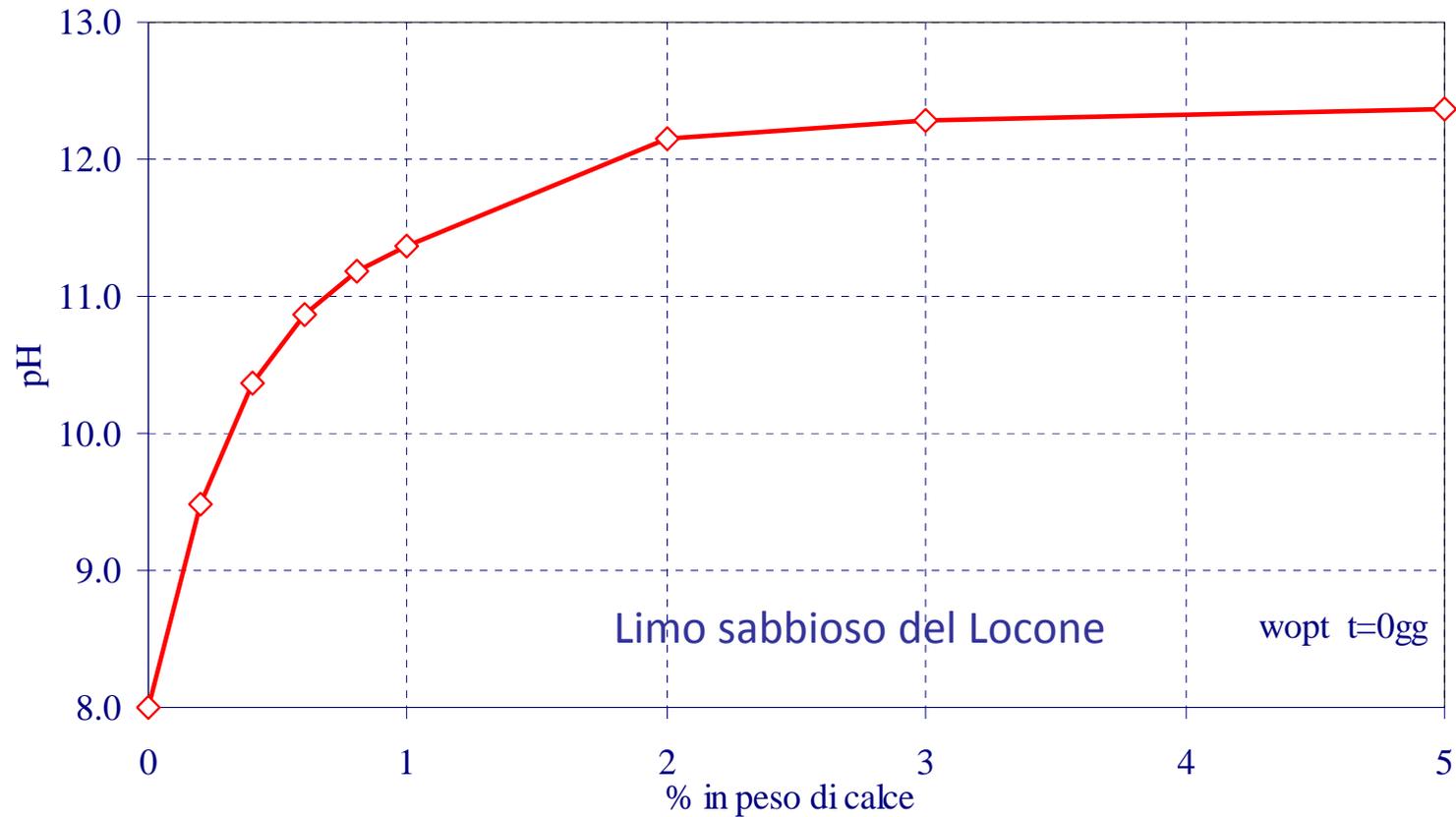
---

- EFFICACIA
- EFFICIENZA
- DURABILITA'

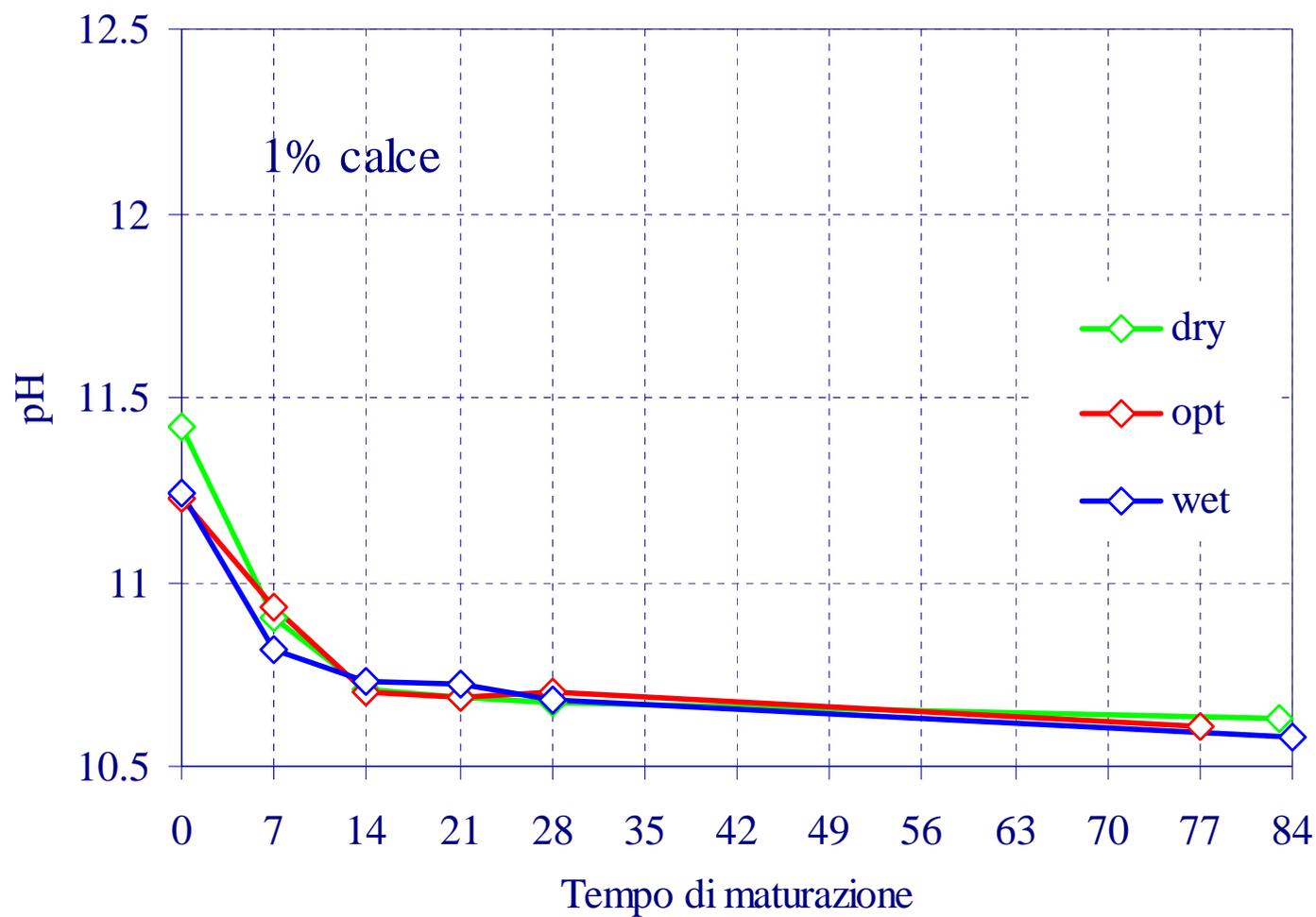


# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

Consumo Iniziale di Calce, C.I.C.



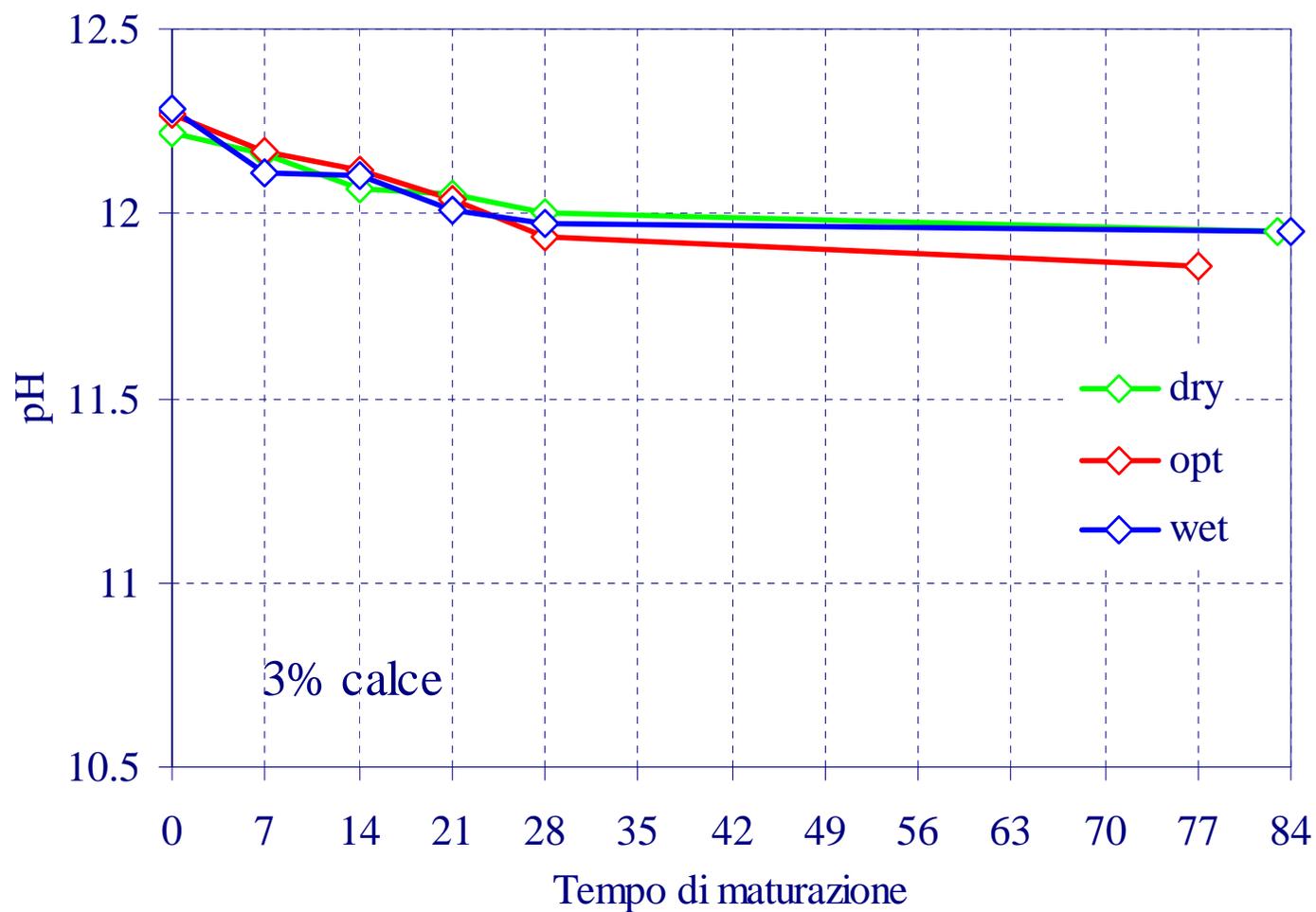
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Limo sabbioso del Locone



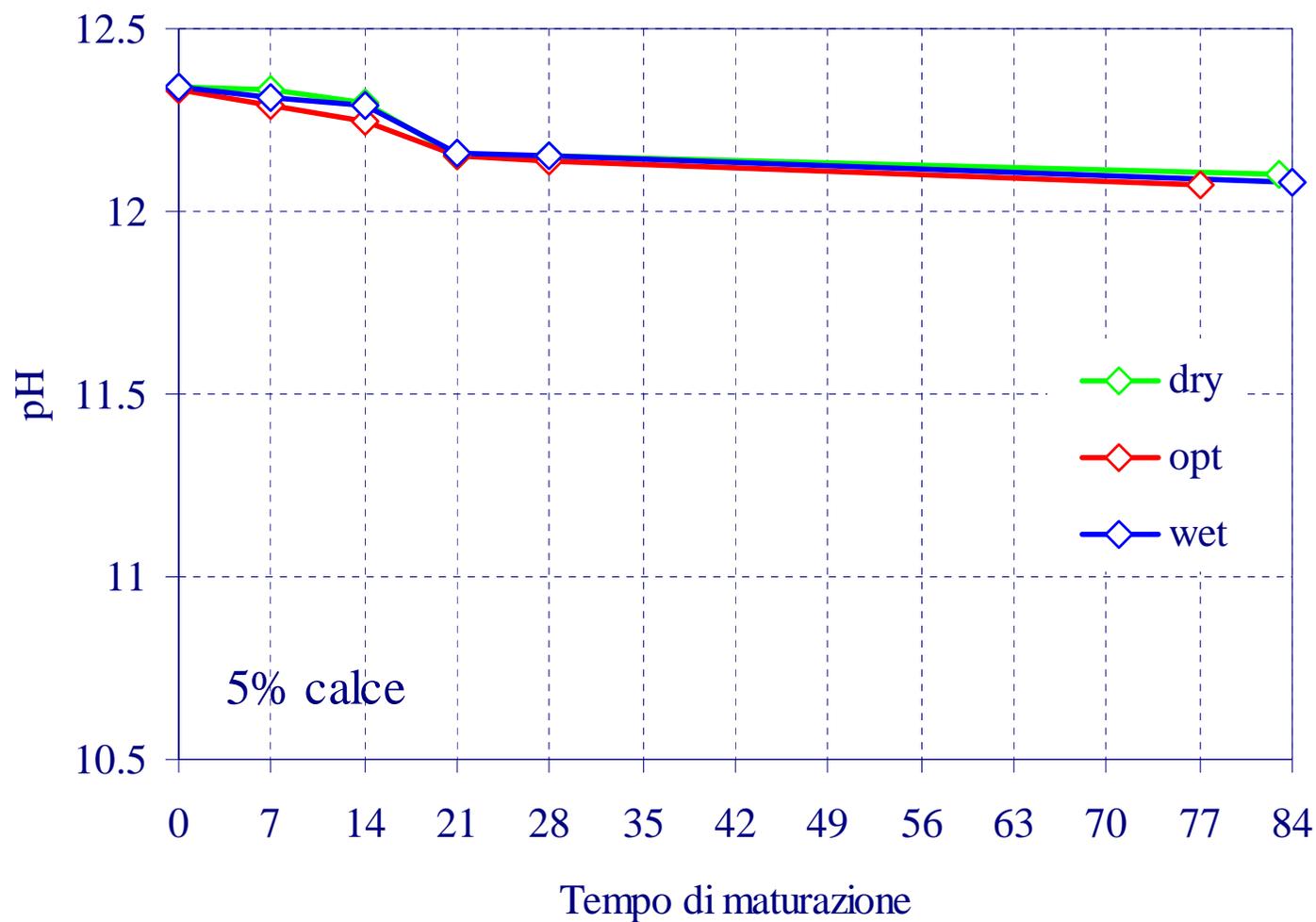
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Limo sabbioso del Locone



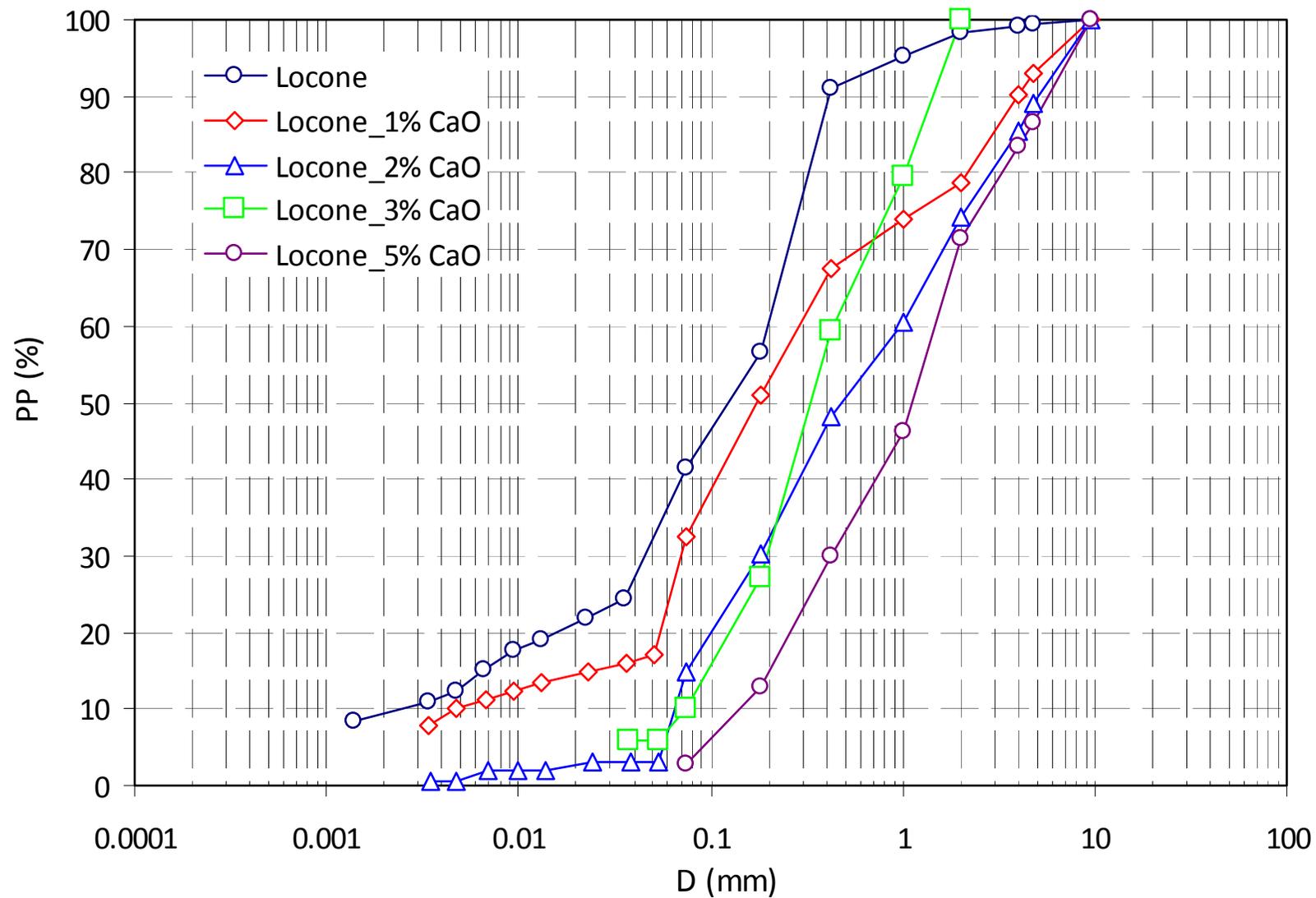
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



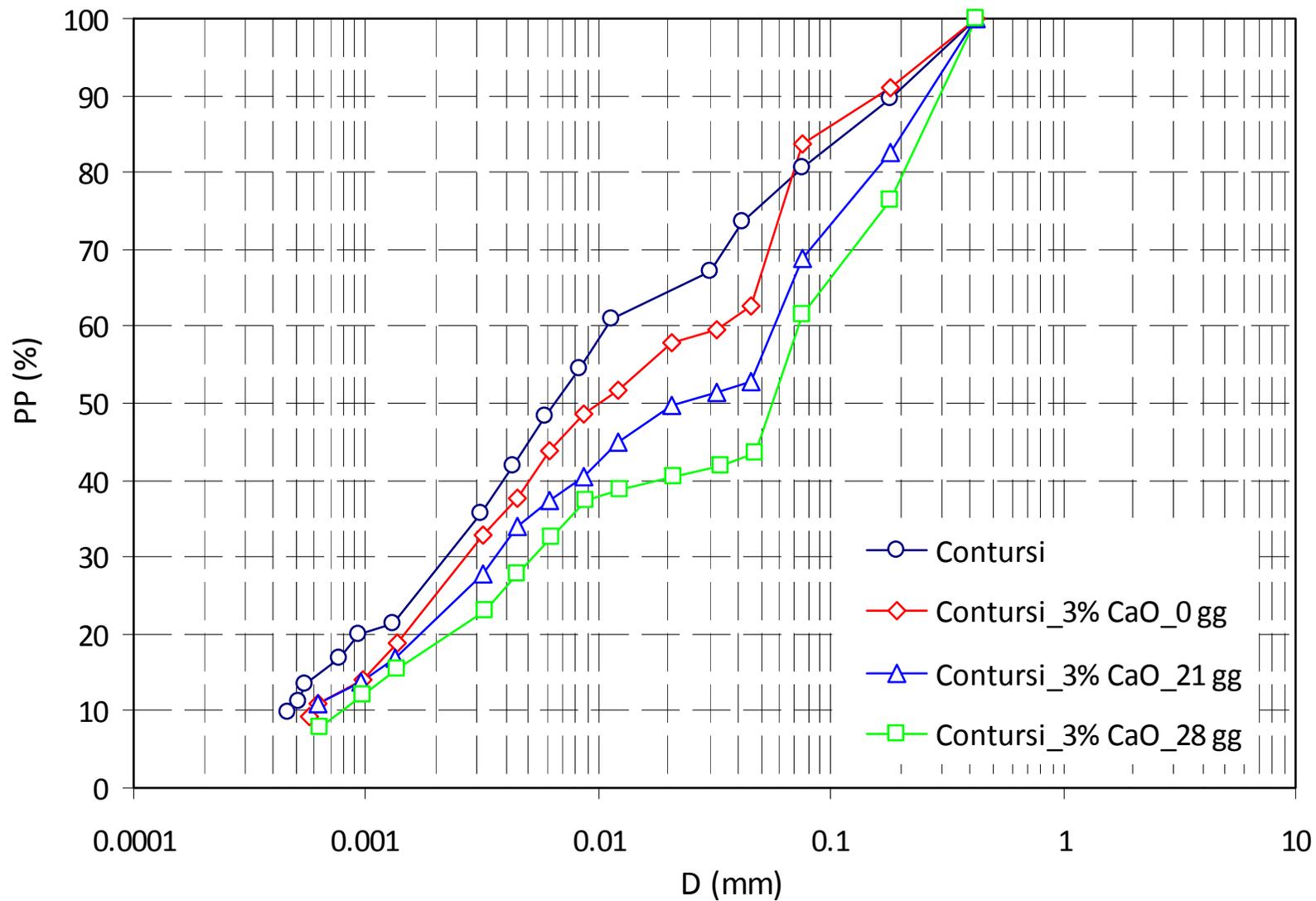
Limo sabbioso del Locone



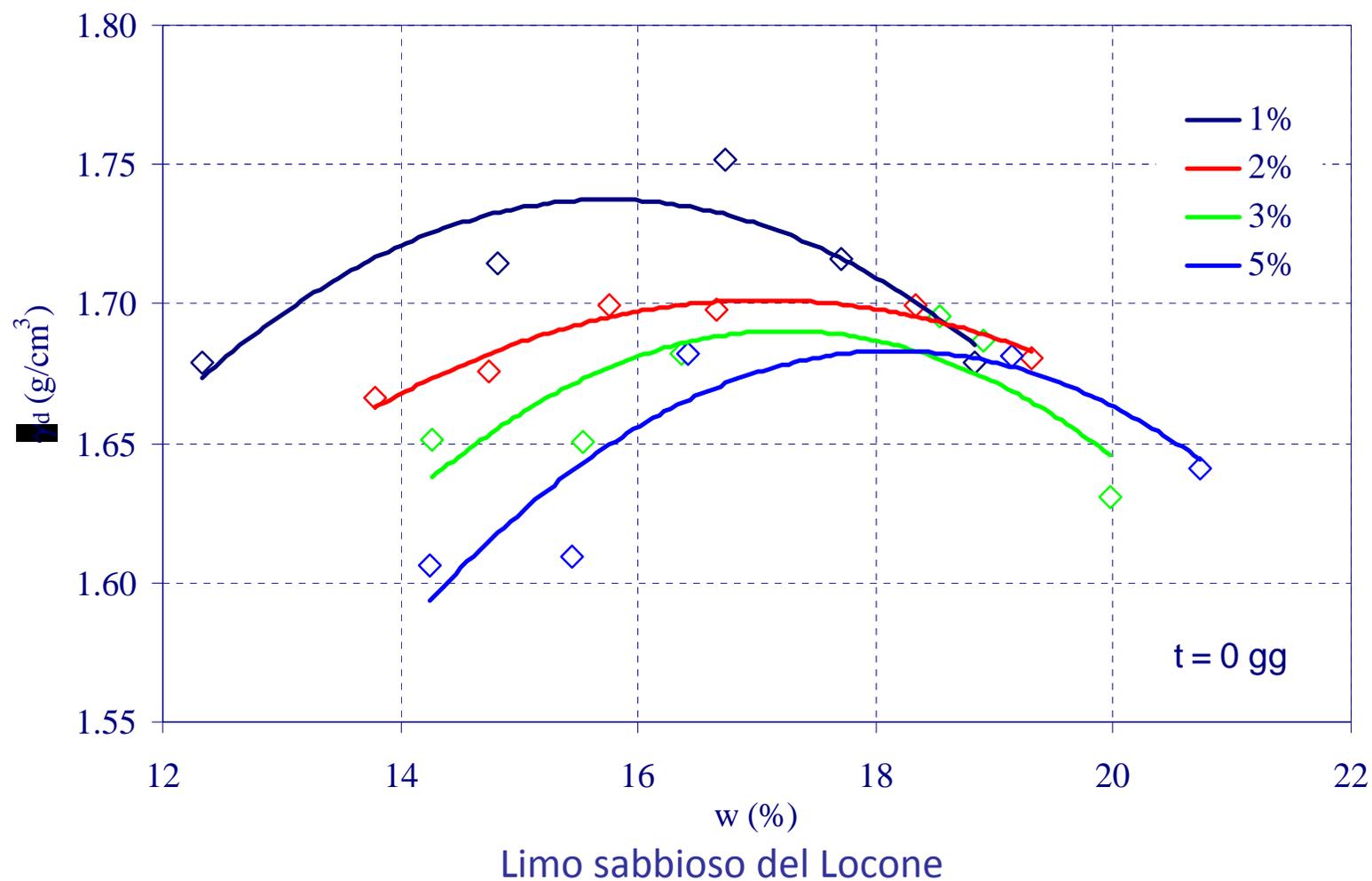
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



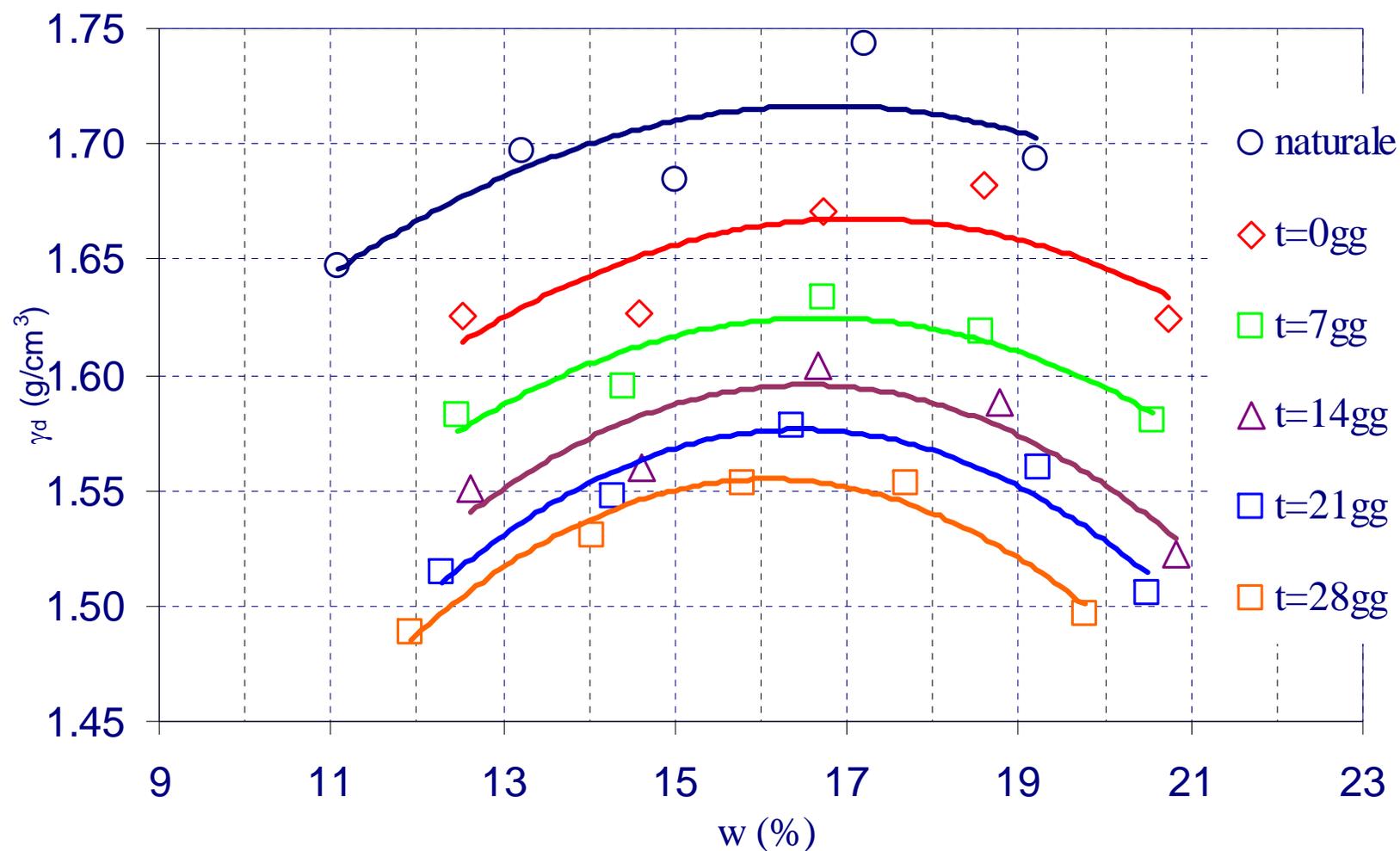
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



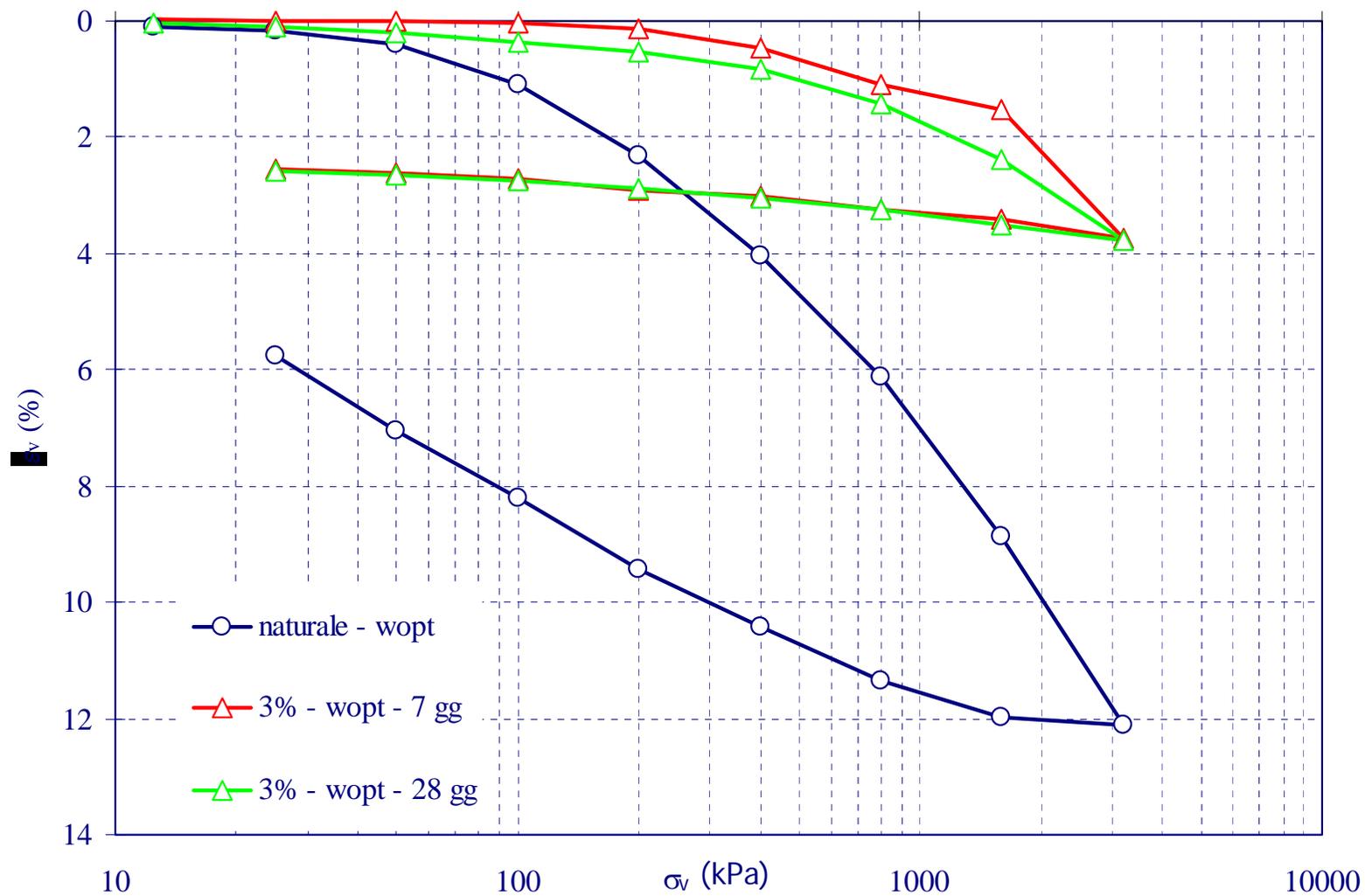
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



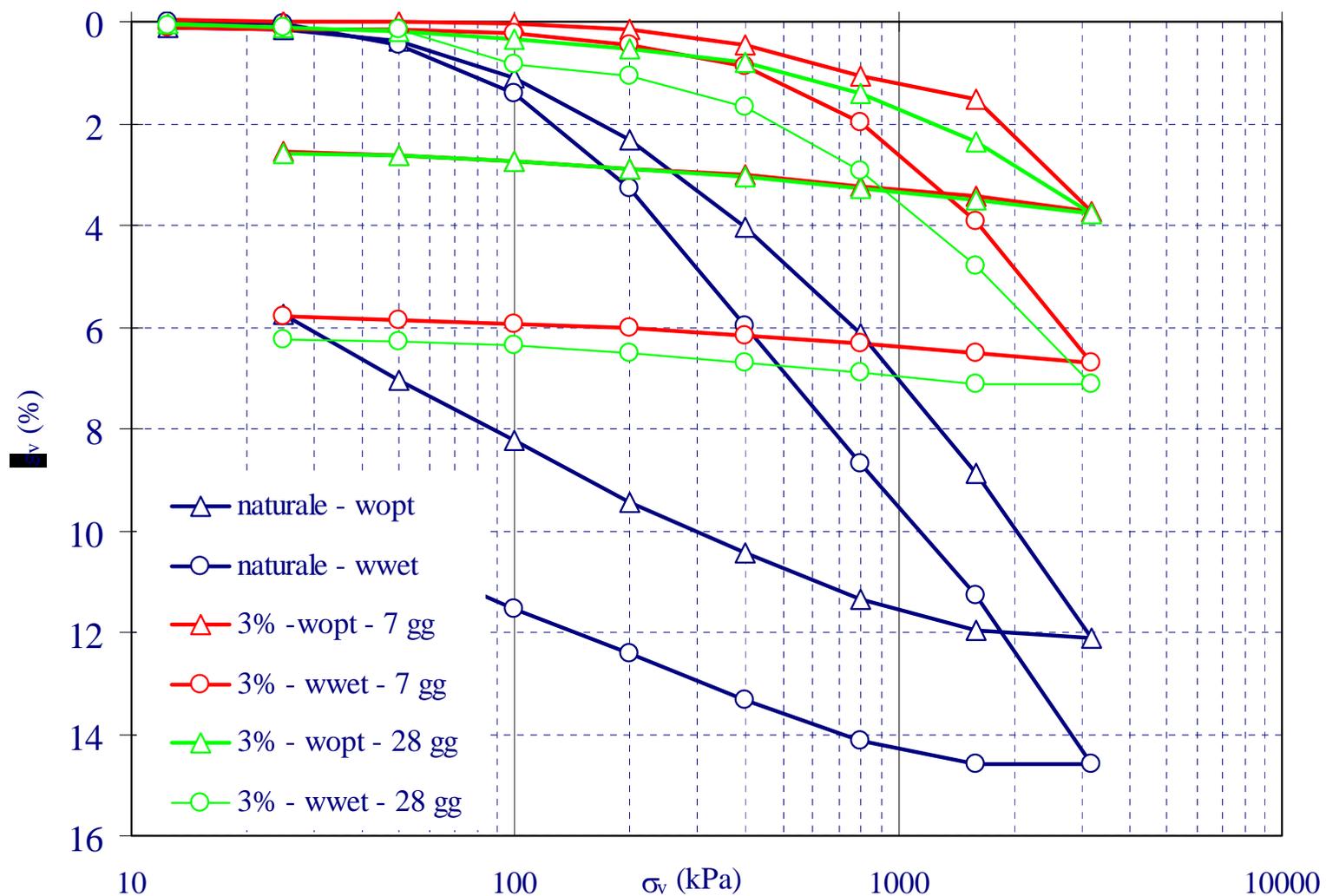
Limo sabbioso del Locone



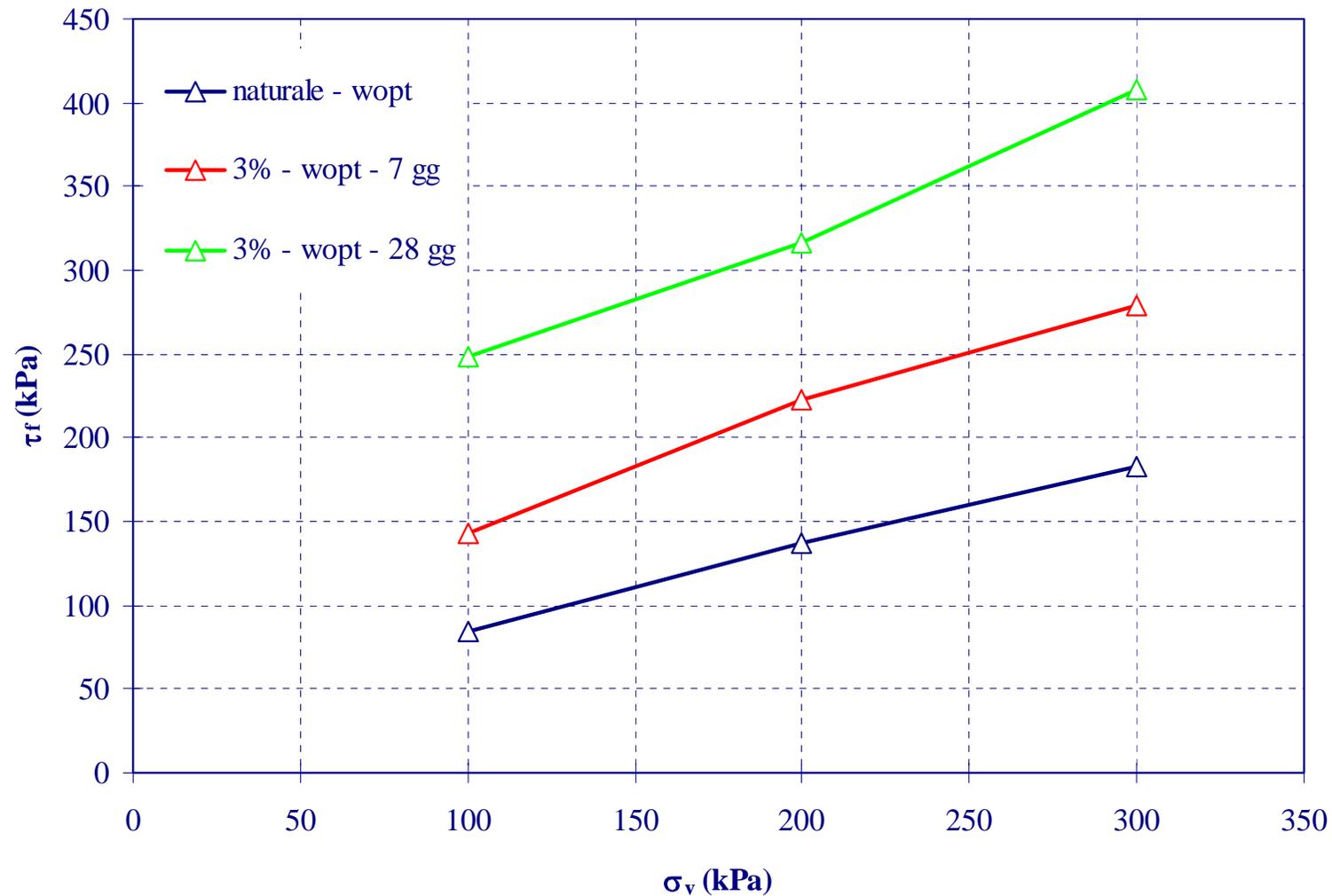
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



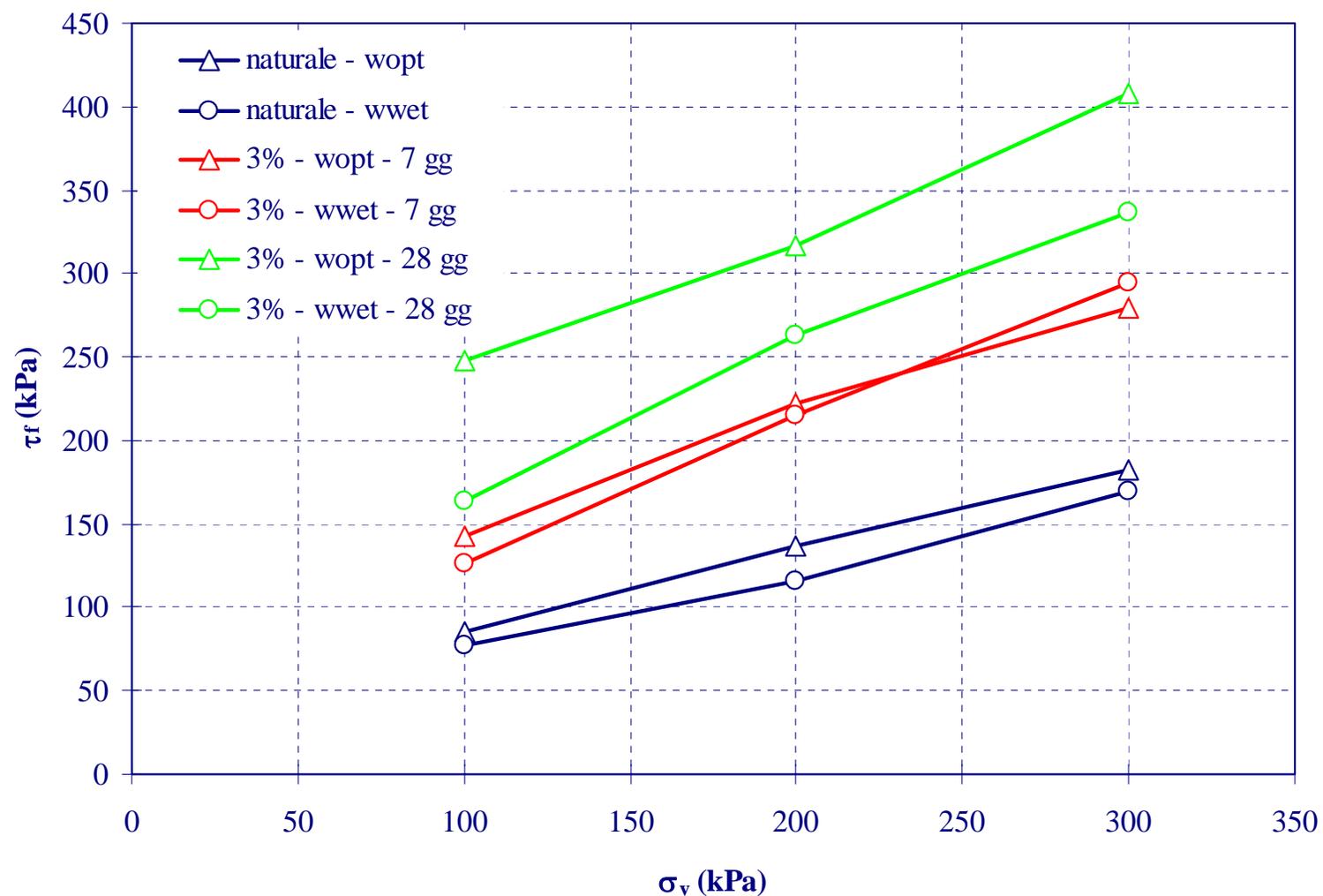
# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



# EFFICIENZA DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



# EFFETTI DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

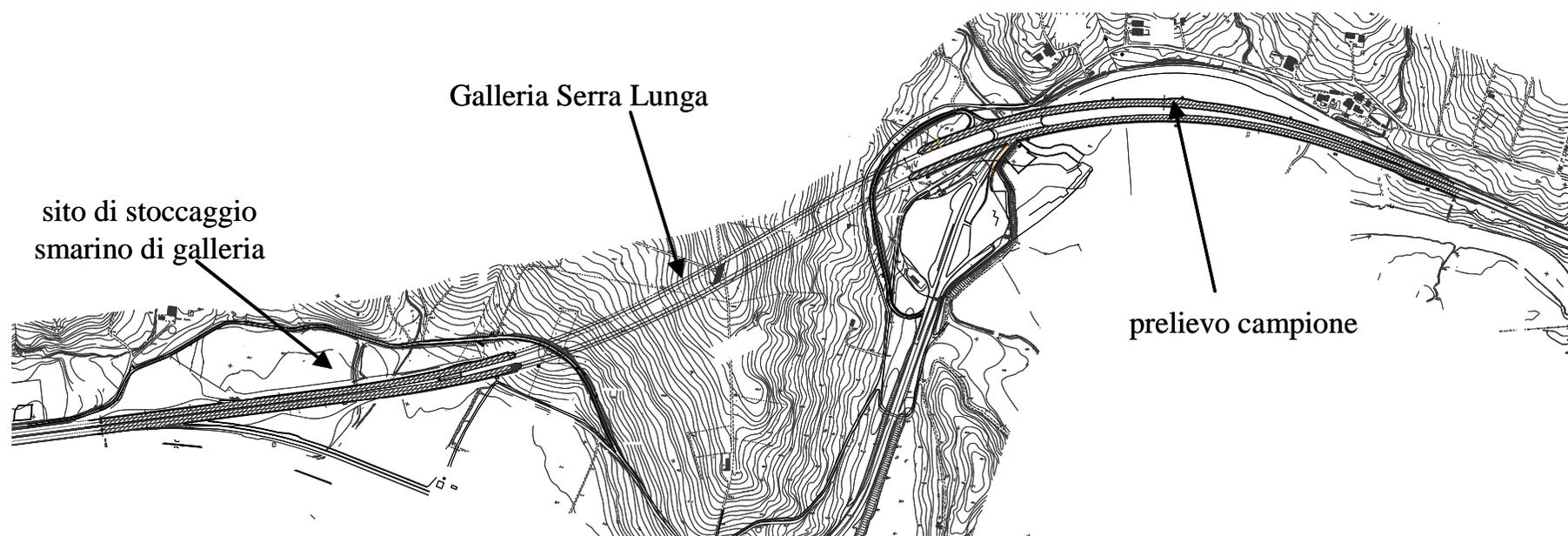
---

- EFFICACIA
- EFFICIENZA
- DURABILITA'



# DURABILITA' DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE

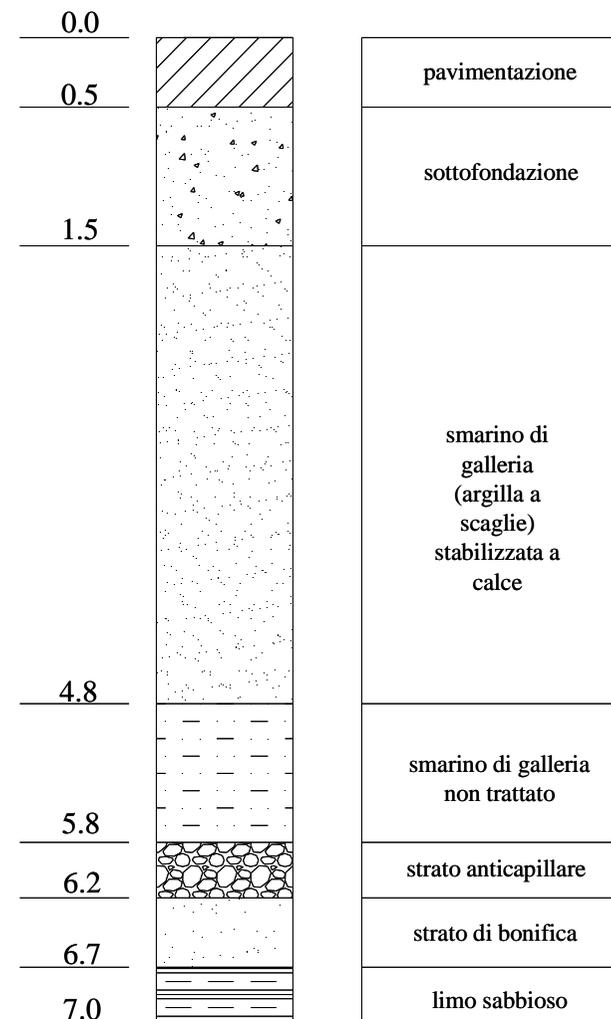
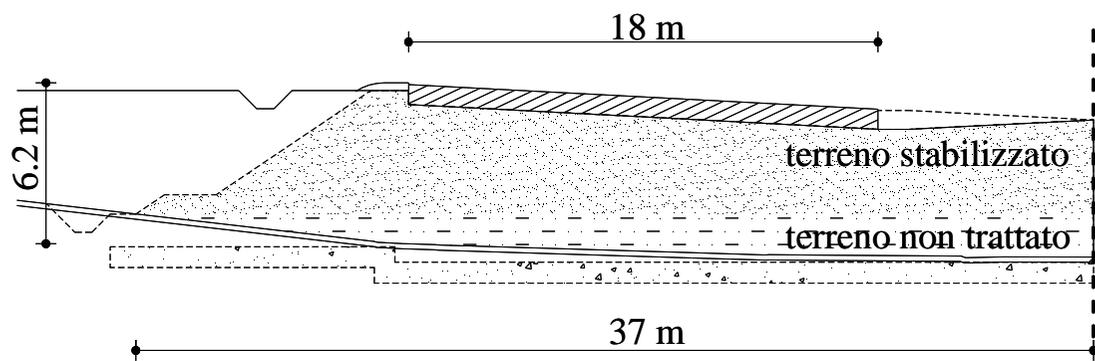
ANAS - Autostrada Salerno-Reggio Calabria  
Lavori di ammodernamento ed adeguamento al tipo 1°b delle norme CNR/80  
Tronco 1° - Tratto 5° - Lotto 2° (dal km 40+100 al km 47+800)



Russo G., Croce P. e Nocera N. (2011). *Experimental investigation on durability of a lime stabilised soil*, XV ECMSG Athens 2011.



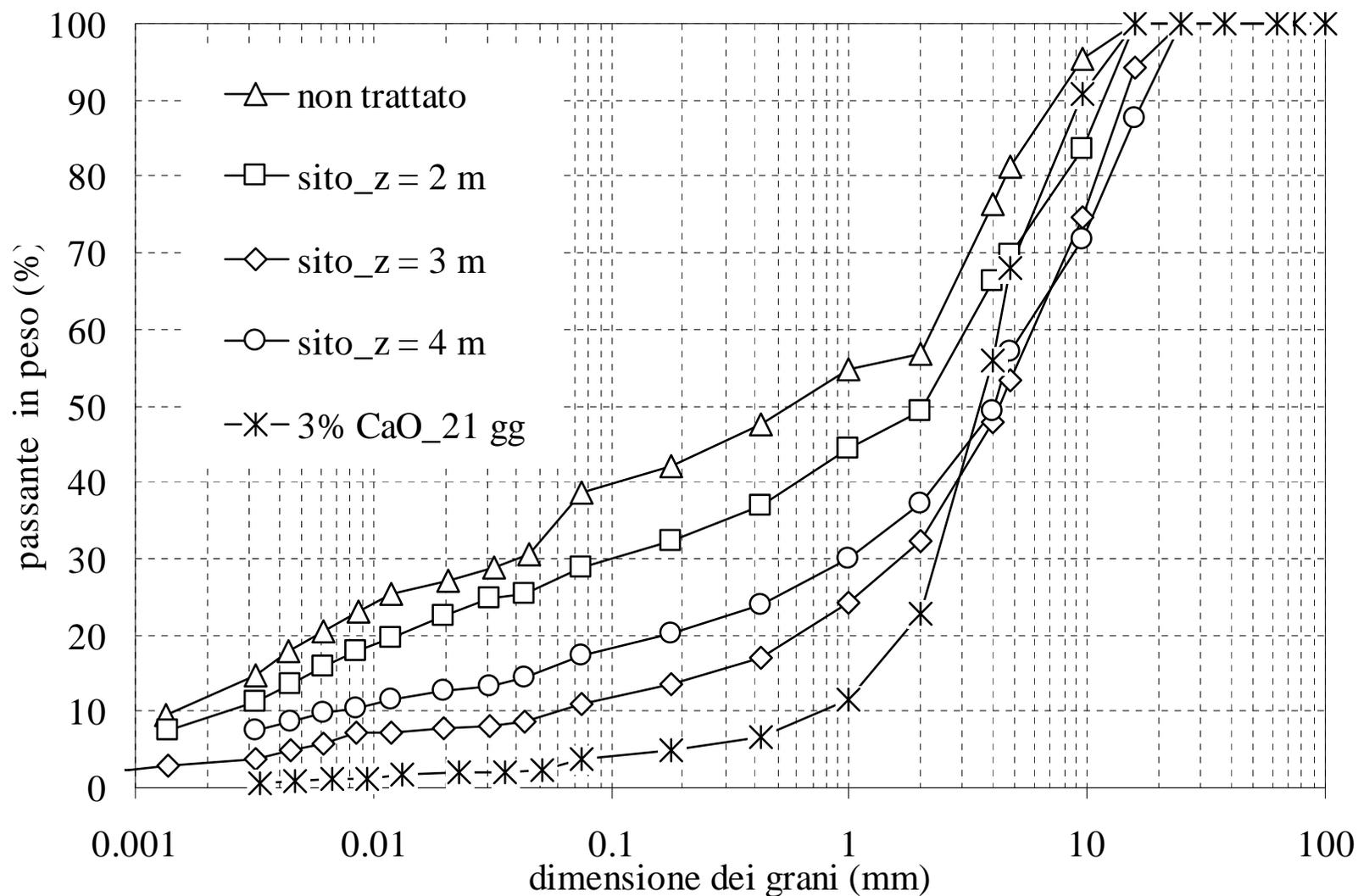
# DURABILITA' DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Russo G., Croce P. e Nocera N. (2011). *Experimental investigation on durability of a lime stabilised soil*, XV ECSMGE Athens 2011.



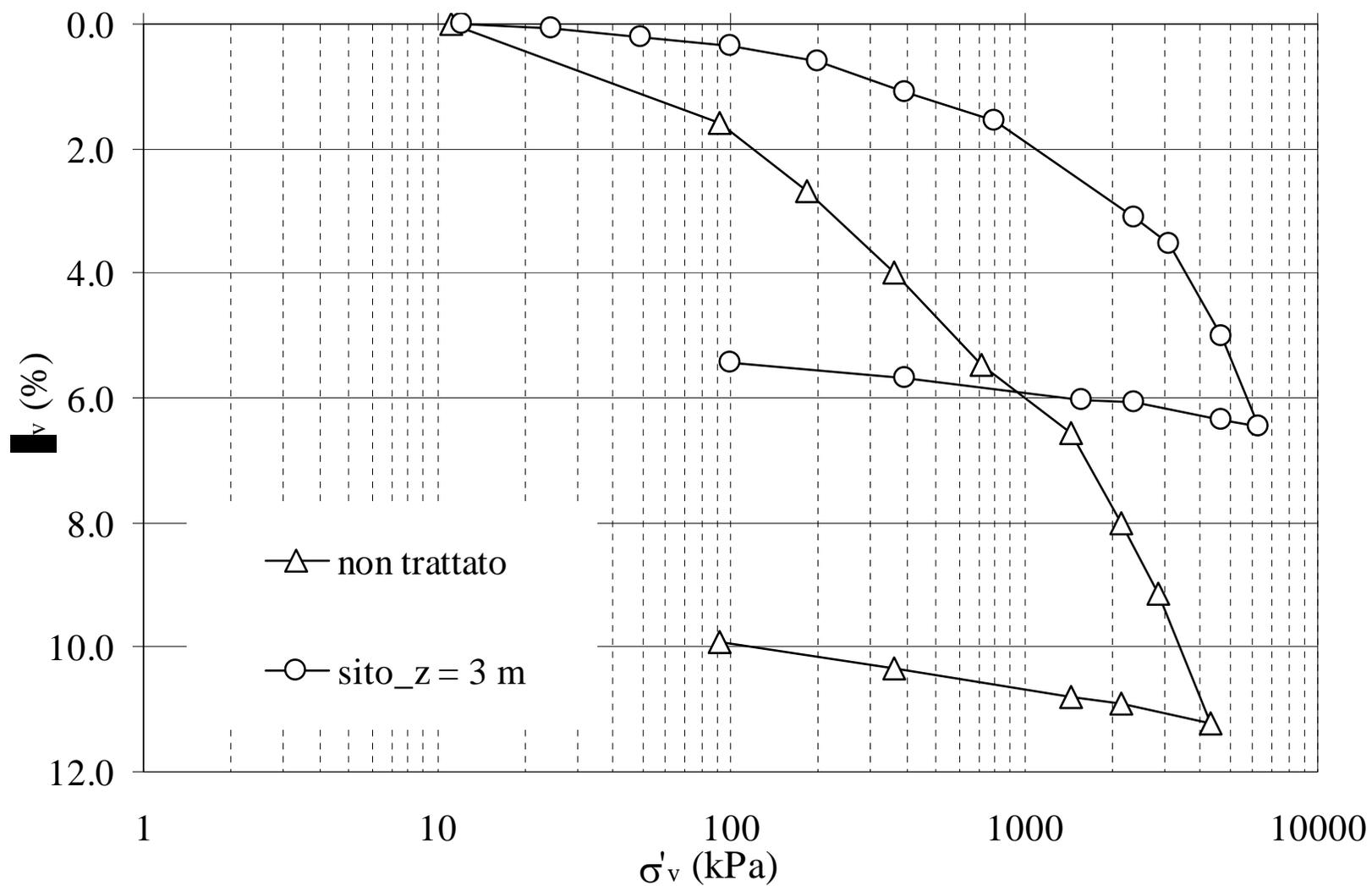
# DURABILITA' DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Russo G., Croce P. e Nocera N. (2011). *Experimental investigation on durability of a lime stabilised soil*, XV ECMSG Athens 2011.



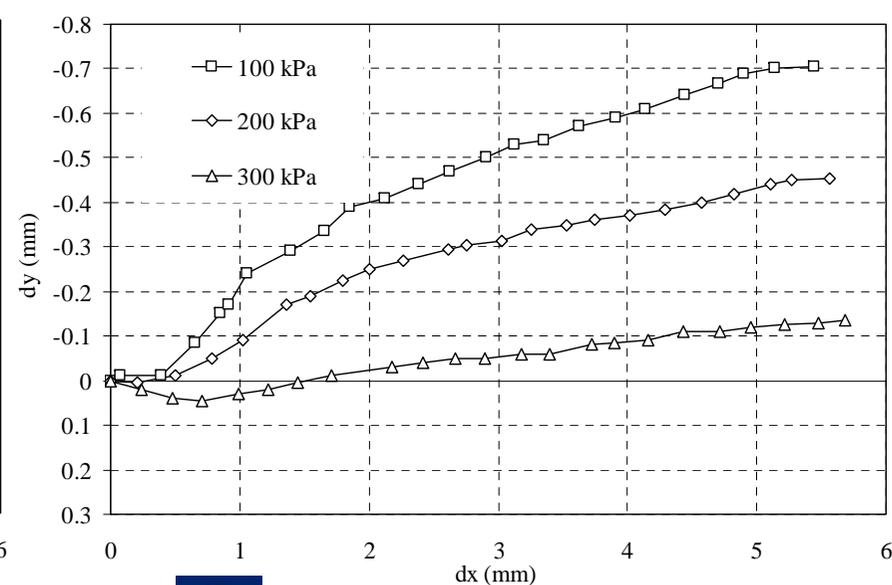
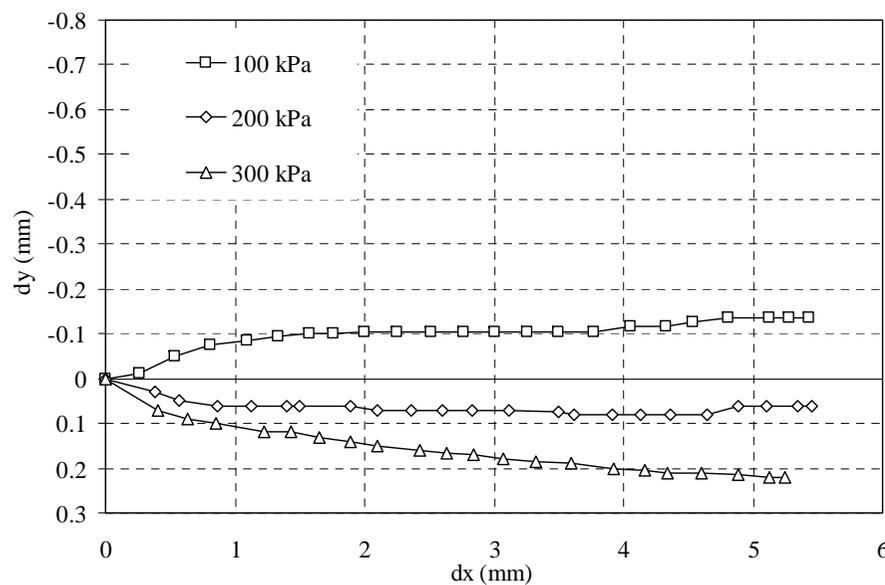
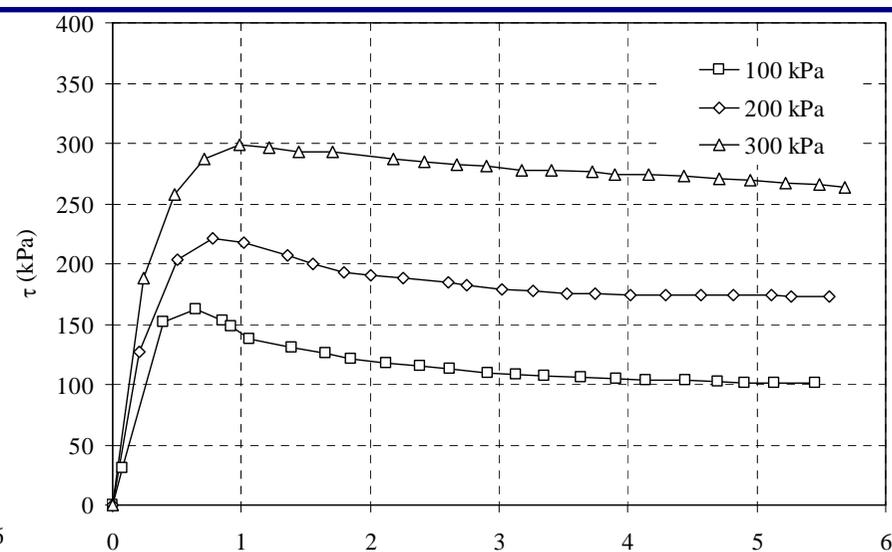
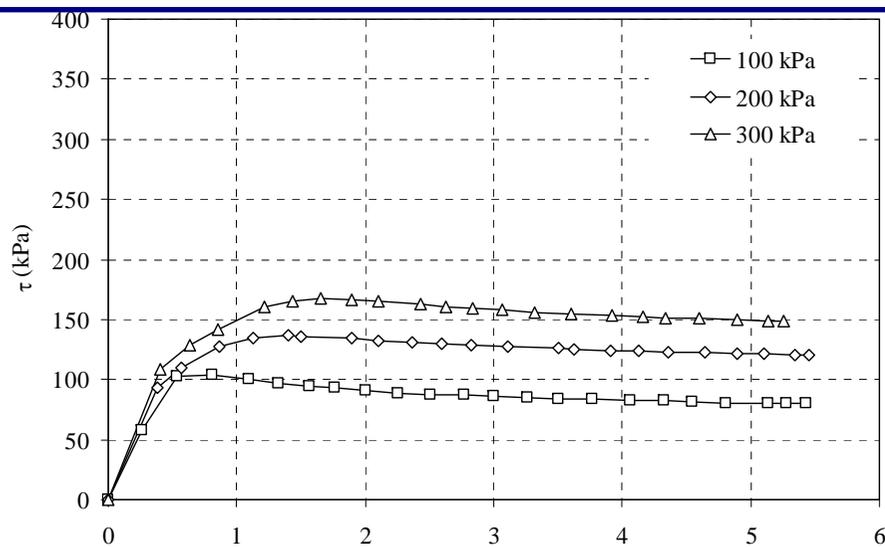
# DURABILITA' DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Russo G., Croce P. e Nocera N. (2011). *Experimental investigation on durability of a lime stabilised soil*, XV ECMSG Athens 2011.



# DURABILITA' DELLA STABILIZZAZIONE A CALCE



Russo G., Croce P. e Nocera N. (2011). *Experimental investigation on durability of a lime stabilised soil*, XV ECMSG Athens 2011.





CONVEGNO ALIG  
STABILIZZAZIONE DEI TERRENI CON CALCE  
PESARO, 29 APRILE 2011

## EFFETTI INDOTTI DAL TRATTAMENTO A CALCE SULLE PROPRIETA' FISICHE E MECCANICHE DEI TERRENI

GIACOMO RUSSO



Facoltà di Ingegneria - Università di Cassino  
Dipartimento di Meccanica, Strutture, Ambiente e Territorio





# **MIX DESIGN DELLA MISCELA TERRA CALCE E DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI RIFERIMENTO PER IL CONTROLLO QUALITÀ**

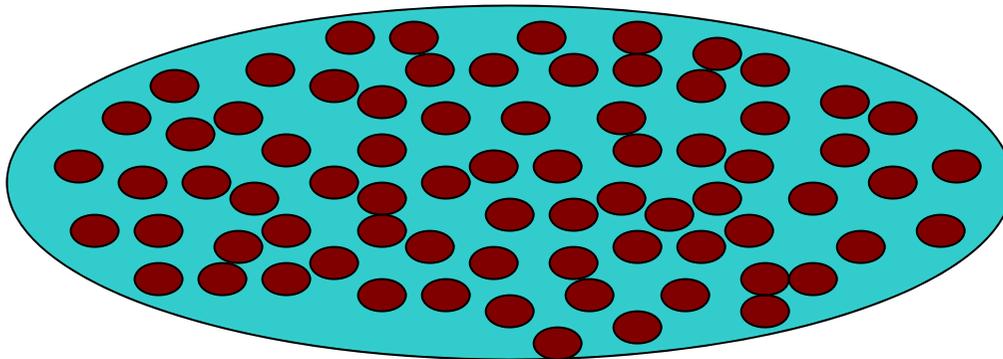
**GABRIELE TEBALDI, PH.D., P.E.**

# Stabilizzazione a calce

## Principio base

**L'argilla con il suo contenuto naturale d'acqua (umidità naturale) costituisce una soluzione colloidale**

Un colloide è una sostanza che si trova in uno stato finemente disperso, intermedio tra la soluzione omogenea e la sospensione eterogenea. Questo stato "microeterogeneo" consiste quindi di due fasi: una sostanza di dimensioni microscopiche (diametro da  $10^{-9}$  m a  $1\mu\text{m}$ ) dispersa in una fase continua



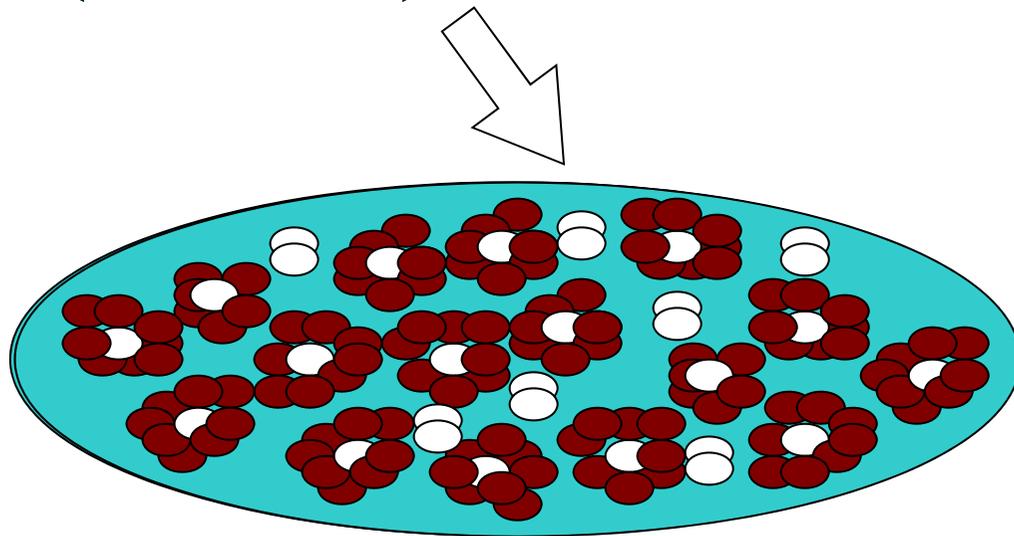
| Dimensione particella |                          |                        |
|-----------------------|--------------------------|------------------------|
| $< 10^{-9}$ m         | $10^{-9} \div 10^{-6}$ m | $> 10^{-6}$ m          |
| Soluzione omogenea    | Colloide                 | Sospensione eterogenea |

# Stabilizzazione a calce

## Principio base

L'argilla con il suo contenuto naturale d'acqua (umidità naturale) costituisce una soluzione colloidale

$\text{Ca}(\text{OH})_2$   
(calce idrata)



2÷3 ore dopo la miscelazione

In acqua una parte della calce si in ioni  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{OH}^-$

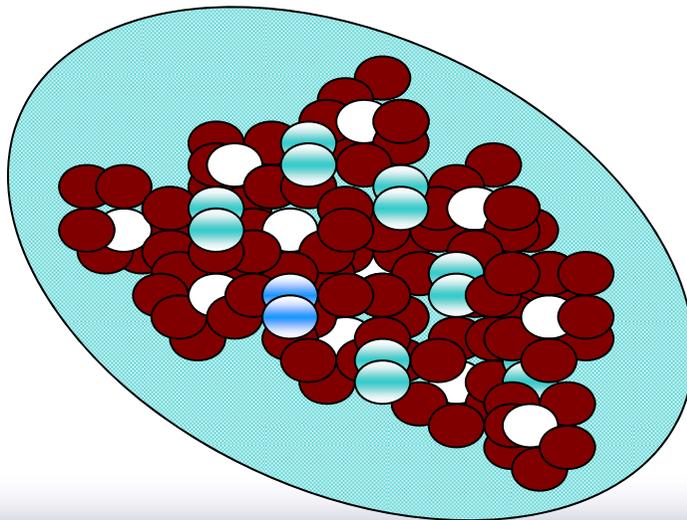
Gli ioni  $\text{OH}^-$  aumentano il pH della soluzione

in queste condizioni gli ioni  $\text{Ca}^{2+}$  fissano le particelle di argilla attorno ad essi creando macro-particelle estremamente stabili

*(flocculazione dell'argilla)*

# Stabilizzazione a calce

Dopo la compattazione sfruttando l'umidità della miscela hanno inizio le **reazioni pozzolaniche** tra calce non coinvolta nella flocculazione, acqua silicati e allumina costituenti le argille, che cementano (con una reazione simile all'idratazione del cemento Portland) le macro-particelle generate dalla flocculazione

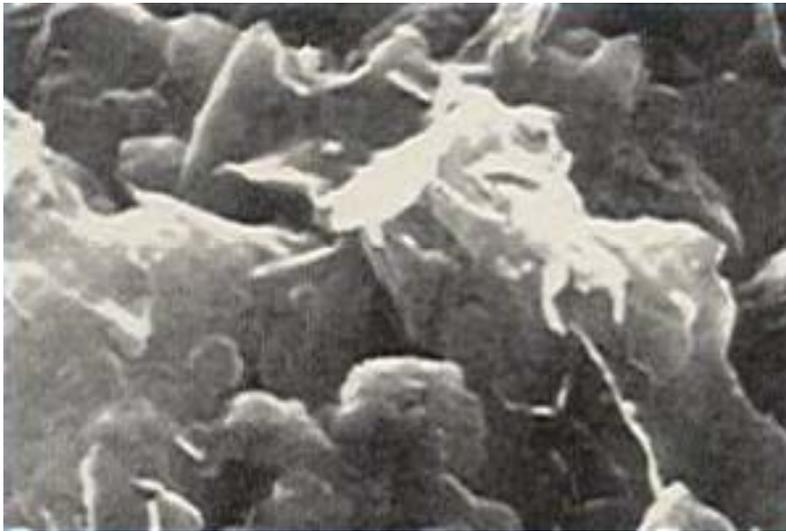


**In queste condizioni l'argilla**

- **non rigonfia**
- **non perde coesione a contatto con l'acqua**
- **è più compattabile**
- **aumenta le sue prestazioni meccaniche**

# *Stabilizzazione a calce*

## Reazioni pozzolaniche



Senza Calce



Con Calce

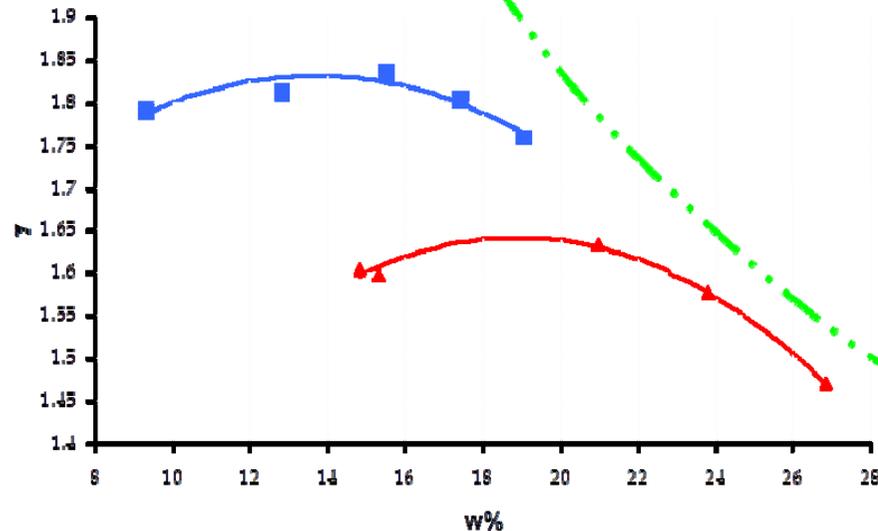
# Stabilizzazione a calce

calce idrata/idrossido di calcio  $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$

calce viva/ossido di calcio  $[\text{CaO}]$



Curva di massima densità

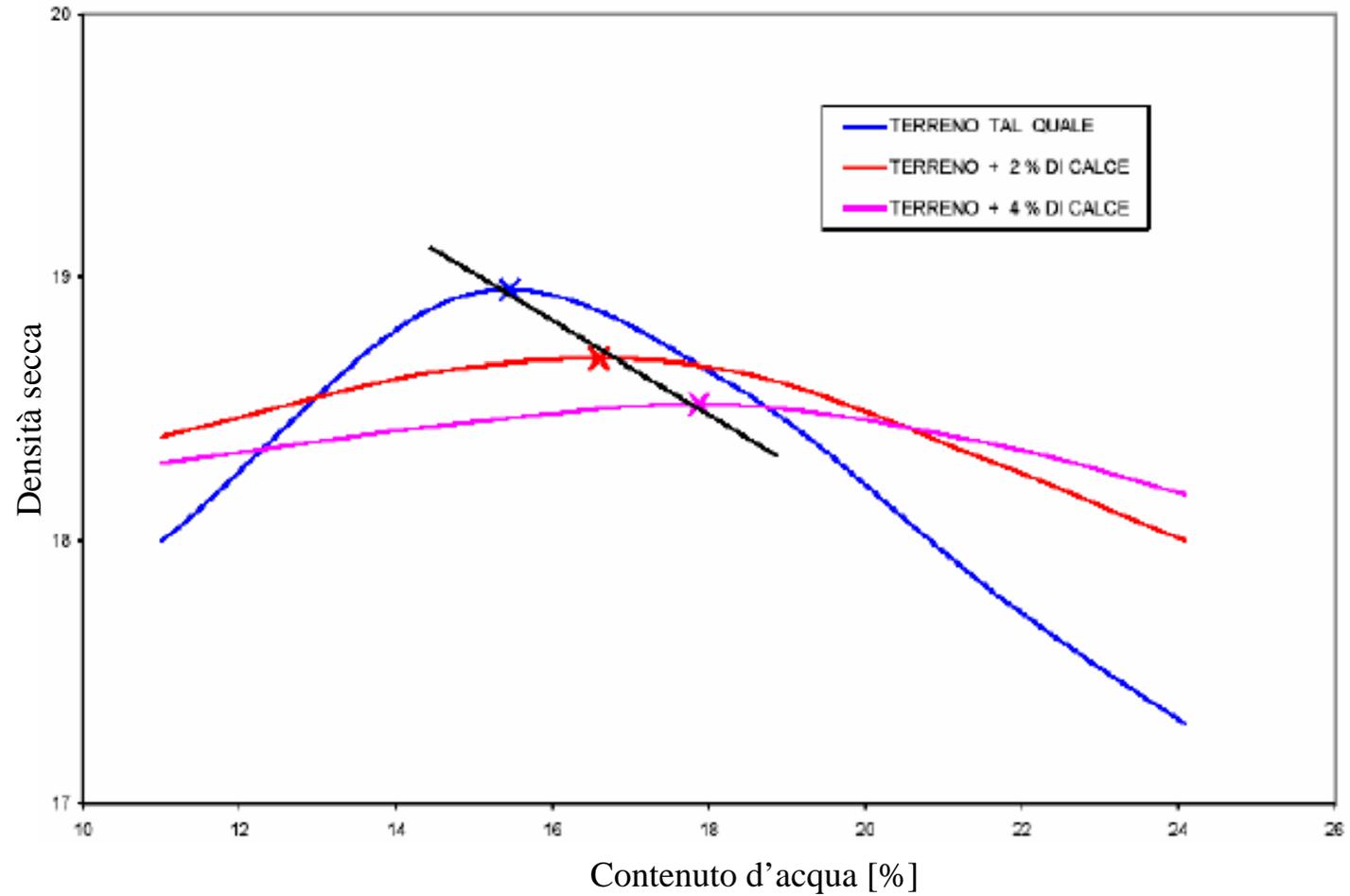


Aumento del volume dei granuli

$W_{\text{ott. terre stabilizzate}} > W_{\text{ott. terra naturale}}$

# Stabilizzazione a calce

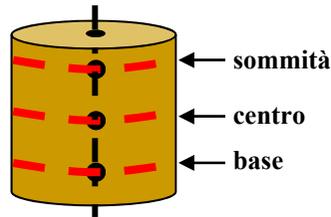
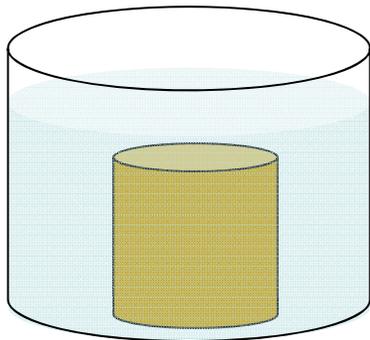
University of Parma



# Stabilizzazione a calce

## Effetti della perdita della sensitività all'acqua

.... dopo 96 ore in immersione

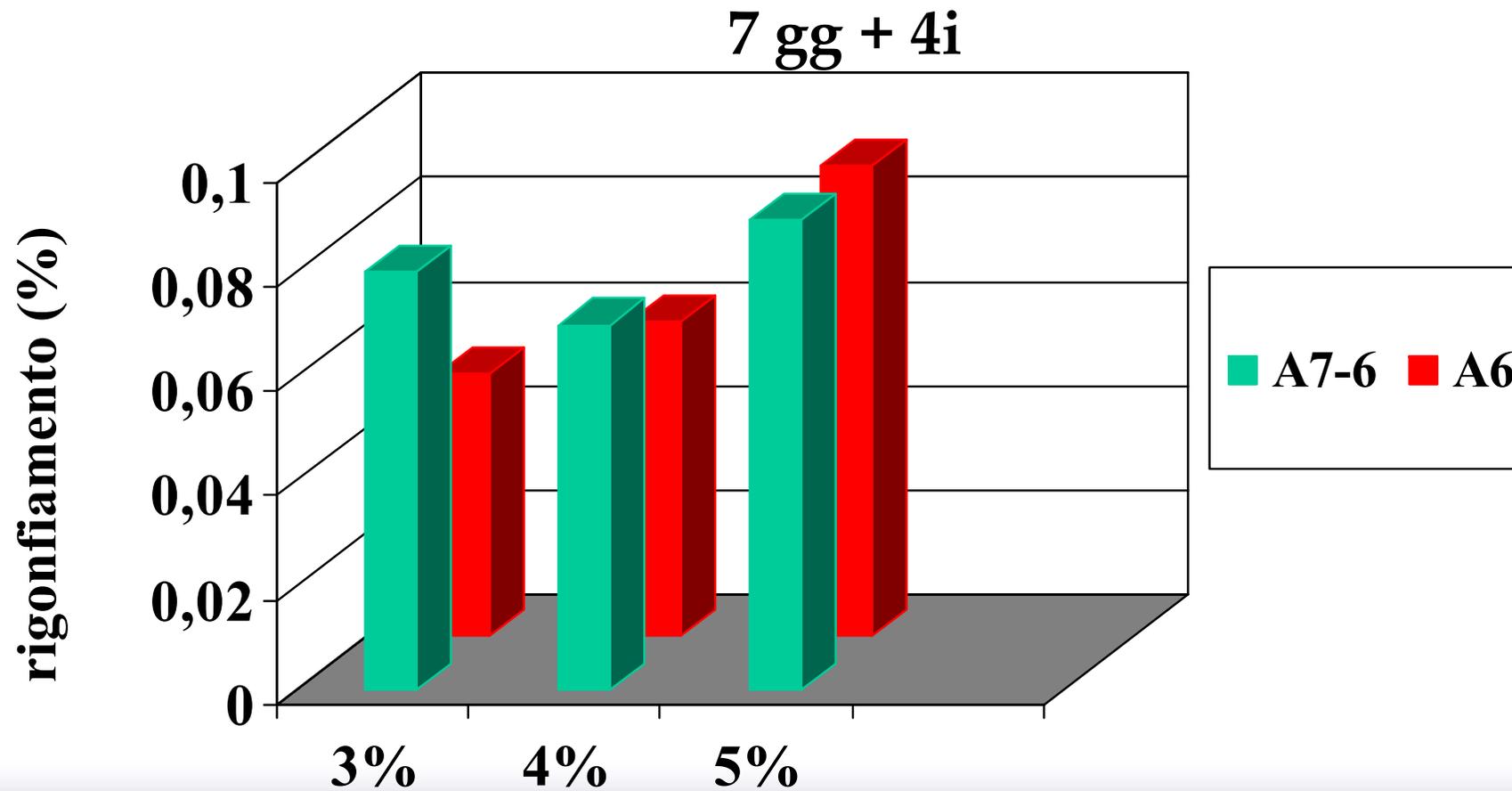


|   | base  | centro | sommità |
|---|-------|--------|---------|
| $W_{96h}\%$                                 | 16.93 | 15.91  | 16.85   |
| <b>W% media prima dell'immersione: 16.0</b> |       |        |         |



# Stabilizzazione a calce

## Effetti della perdita della sensitività all'acqua



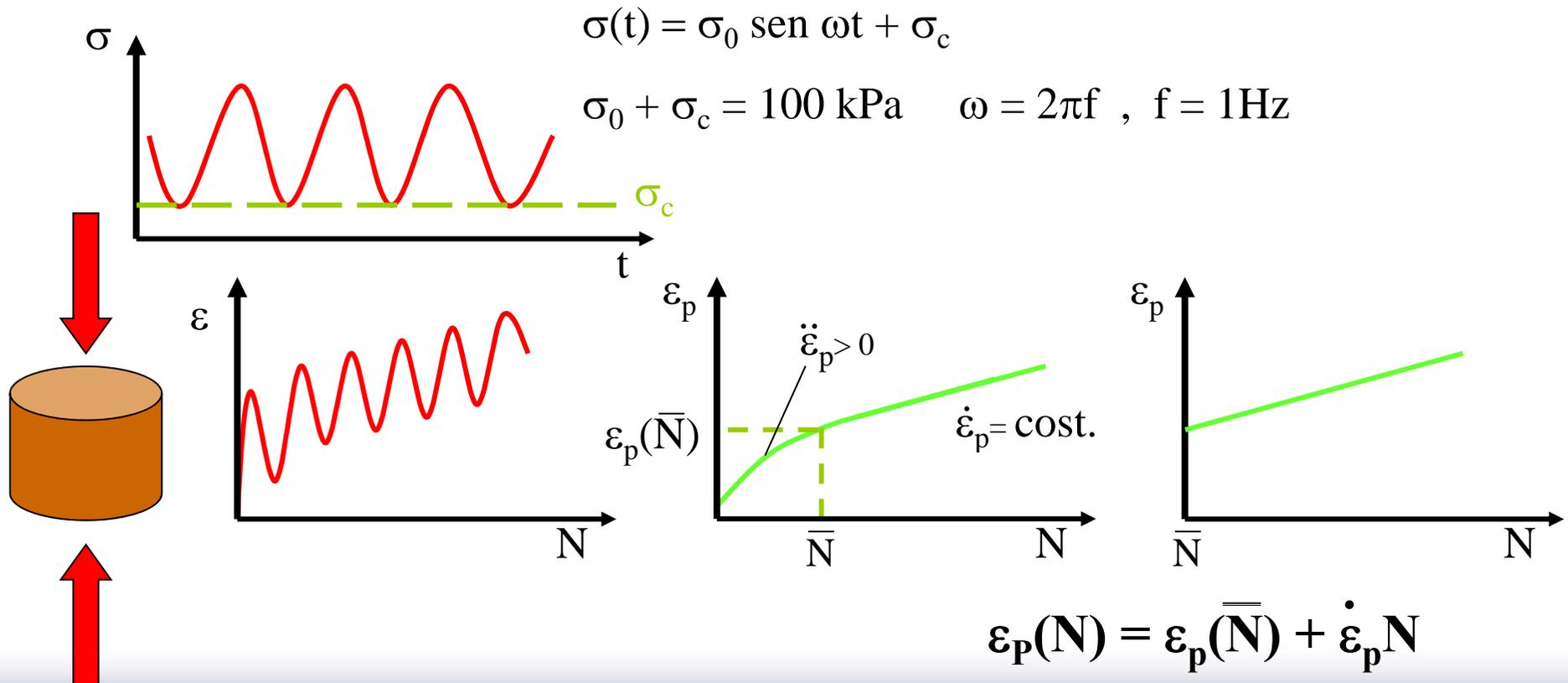
# Stabilizzazione a calce

University of Parma

## Effetto dei carichi dinamici

A. Montepara, G. Tebaldi

*Una nuova metodologia di prova per l'impiego di terre stabilizzate nel corpo stradale*  
SIIV 2000 Catania



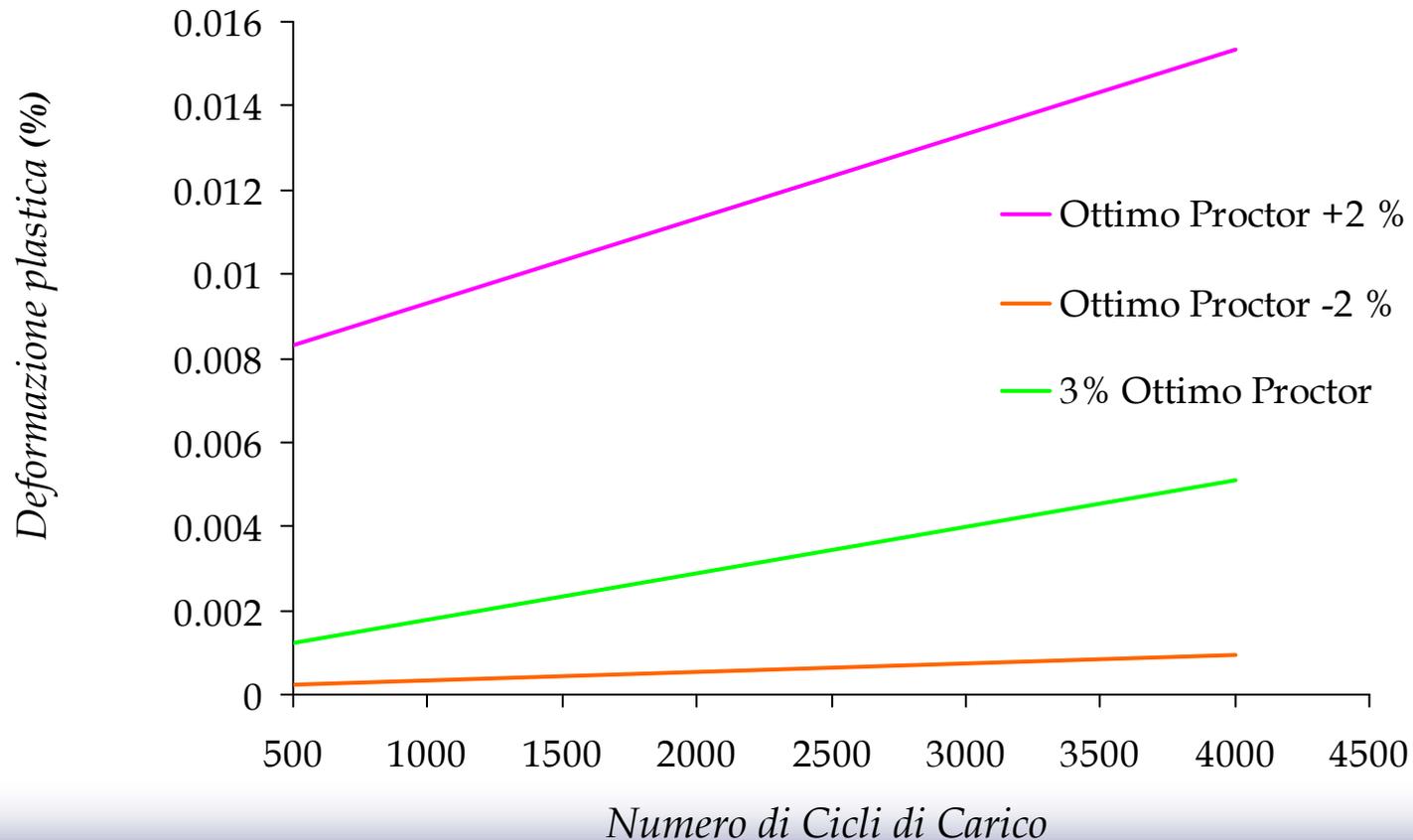


# Stabilizzazione a calce

## Effetto dei carichi dinamici

Creep dinamico - test a 28 giorni dopo la compattazione

(A.A.S.H.T.O. modificata)



# Mix Design

University of Parma

## Classificazione della terra

Test: limiti di Atterberg e analisi granulometrica

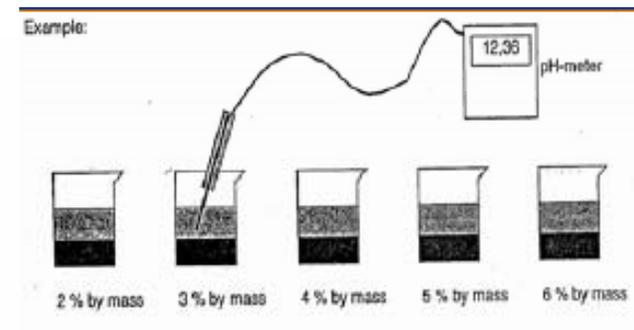
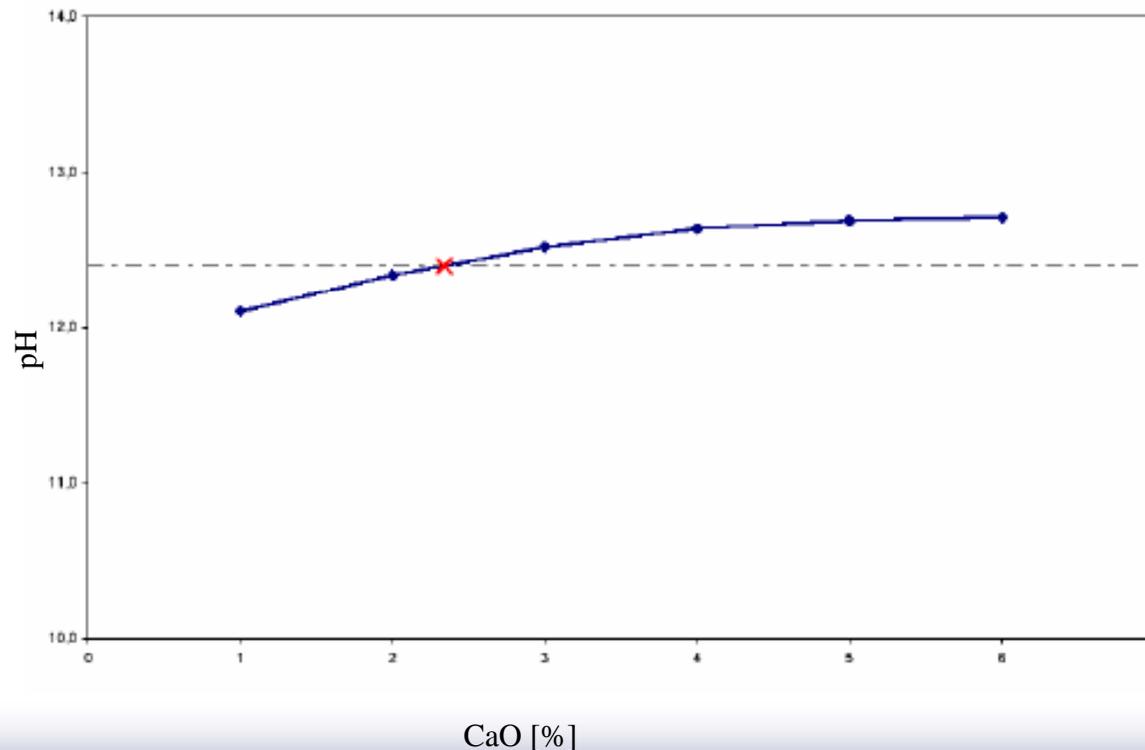
⇒ solo le terre argillose ( $A_7$  e  $A_6$ ) oppure quelle con alto contenuto di argilla ( $A_{2-6}$  e  $A_{2-7}$ ) possono essere stabilizzate a calce, in tutti gli altri casi la calce induce solo una riduzione del contenuto d'acqua

|               | COARSE-GRAINED SOILS<br>passing to 0.075 sieve < 35% |      |      |      |      |        | FINE-GRAINED SOILS<br>passing to 0.075 sieve > 35% |      |      |      |      |
|---------------|--|------|------|------|------|--------|--|------|------|------|------|
| CLASS         | A1   |      | A3   | A2   |      |        | A4   | A5   | A6   | A7   |      |
| SUBCLASS      | A1-a   | A1-b |      | A2-4 | A2-5 | A2-6   | A2-7   |      |      |      |      |
| < 2.00 mm     | < 50   |      |      |      |      |        |  |      |      |      |      |
| < 0.42 mm     | < 30   | < 50 | > 50 |      |      | > 35 % |  |      |      |      |      |
| < 0.075 mm    | < 15   | < 25 | < 10 | < 35 | < 35 | < 35   | < 35   | > 35 | > 35 | > 35 | > 35 |
| LIQUID LIMIT  |  |      |      | < 40 | > 40 | < 40   | > 40   | < 40 | > 40 | < 40 | > 40 |
| PLASTIC LIMIT | < 6  |      | N.P. | < 10 | < 10 | > 10   | > 10   | < 10 | < 10 | > 10 | > 10 |
| CLASS INDEX   | 0  |      | 0    | 0    |      | < 4    |  | < 8  | < 12 | < 16 | < 20 |

# C.I.C. [ASTM C977-92]

University of Parma

Il consumo immediato di calce è il quantitativo di calce necessario per far avvenire le reazioni che generano la flocculazione dell'argilla





University of Parma

# Mix Design

## Valutazione dell'attitudine alla stabilizzazione della terra

Test: **Consumo immediato di calce (ASTM C977)**

**Determinazione del contenuto di sostanze organiche (AFNOR NF 94-055)**

Solo terre con C.I.C. non inferiore a 1.5% e contenuto di sostanze organiche inferiore a 4% (in alcuni casi si restringe a 3% oppure a 2%) possono essere efficacemente trattate a calce

- ⇒ C.I.C. inferiore a 1.5% può significare che non tutte le particelle fini del terreno sono argillose
- ⇒ Un elevato contenuto di sostanze organiche può ostacolare il processo di flocculazione perchè la calce "attacca" prima le sostanze organiche anzichè reagire con i componenti argillosi della terra.



University of Parma

# ***Controllo Qualità***

- ✓ **Consumo immediato di calce (ASTM C977)**
- ✓ **Determinazione del contenuto di sostanze organiche (AFNOR NF 94-055)**

**Controllo delle caratteristiche della terra/del terreno in sito**

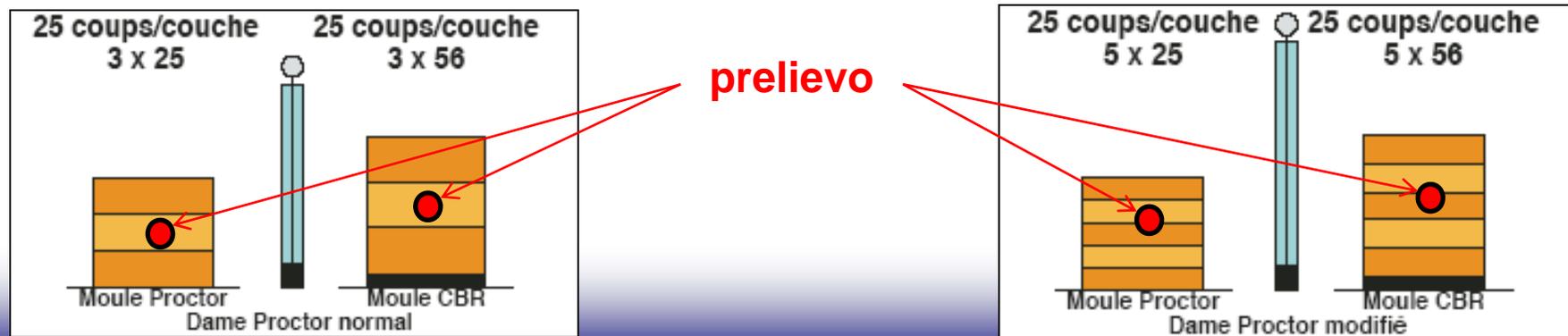
## Definizione del contenuto ottimale di calce

Miscela di primo tentativo con una percentuale di calce pari al C.I.C. + 0,5% sul peso del terreno

### Test: Proctor (standard) & compressione a ELL/CBR

La procedura consiste nell'eseguire contemporaneamente la prova Proctor e la prova a compressione ad EEL oppure la prova CBR (i provini usati per la prova proctor sono usati anche per la prova a compressione o per la prova CBR)

Si ottengono così contemporaneamente densità e contenuto ottimale d'acqua e contemporaneamente la resistenza a compressione, o l'indice C.B.R., al variare del contenuto d'acqua.



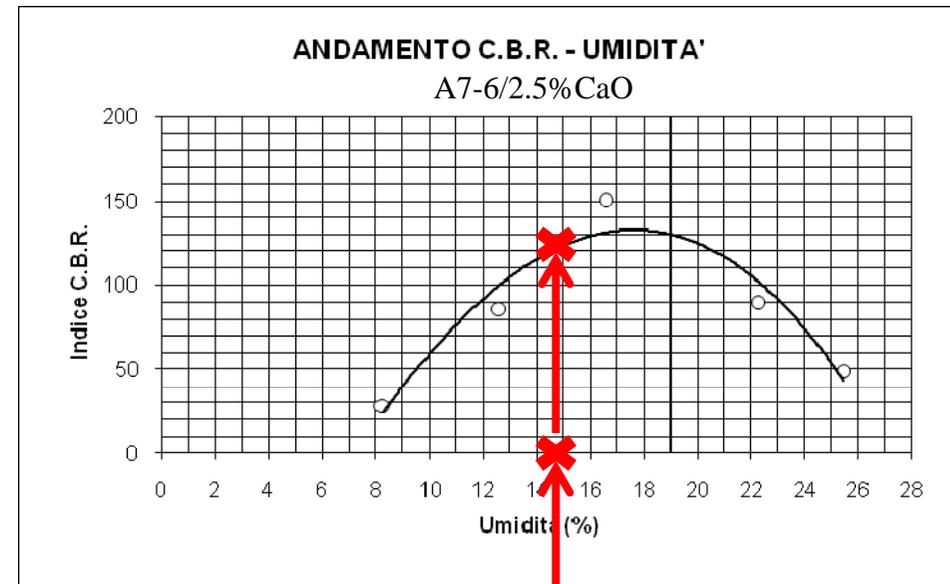
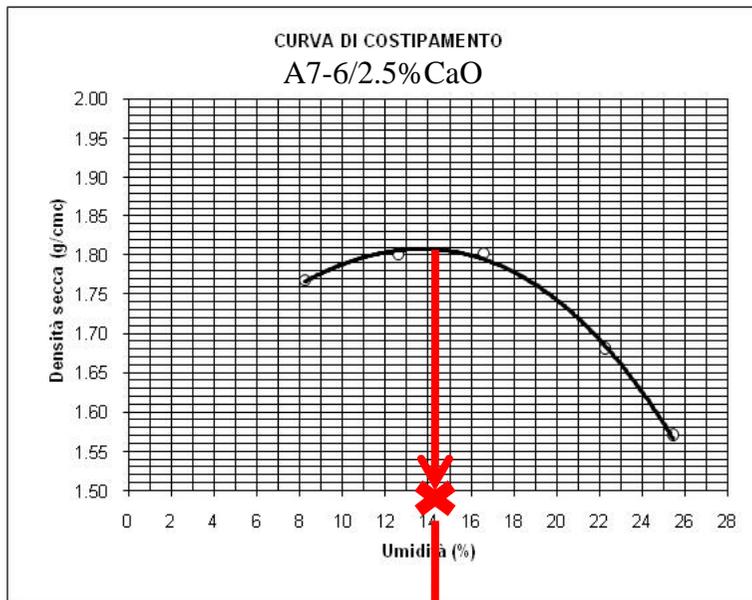


# Mix Design

## Definizione del contenuto ottimale di calce

Miscela di primo tentativo con una percentuale di calce pari a C.I.C. + 0,5% sul peso del terreno

Test: Proctor (standard) & compressione a ELL/CBR



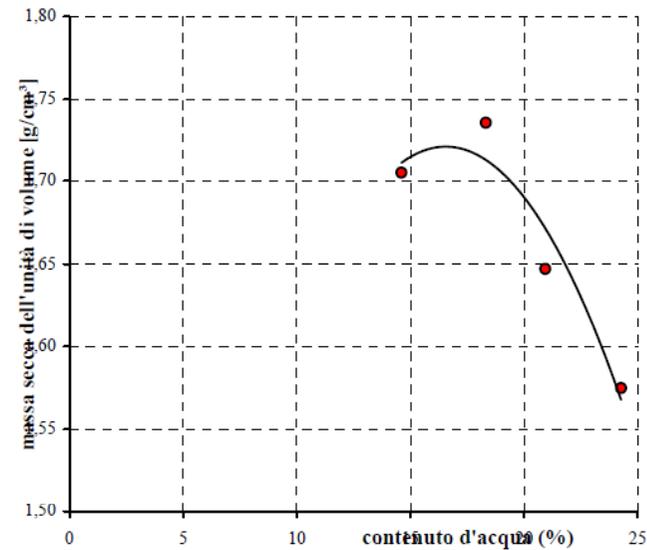
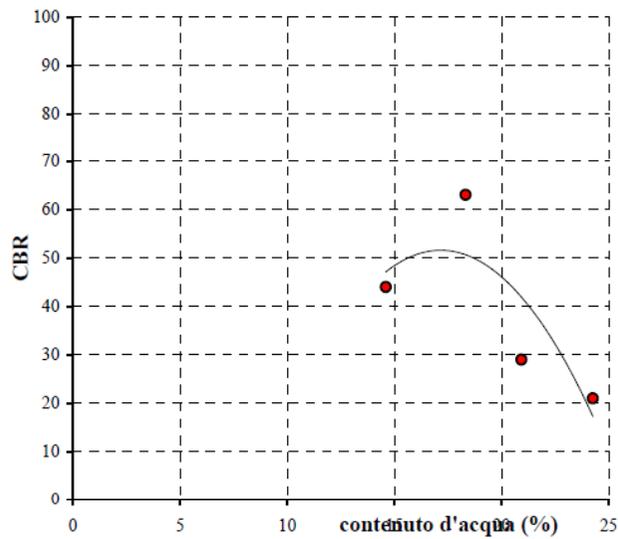
$W_{opt}$



# Mix Design

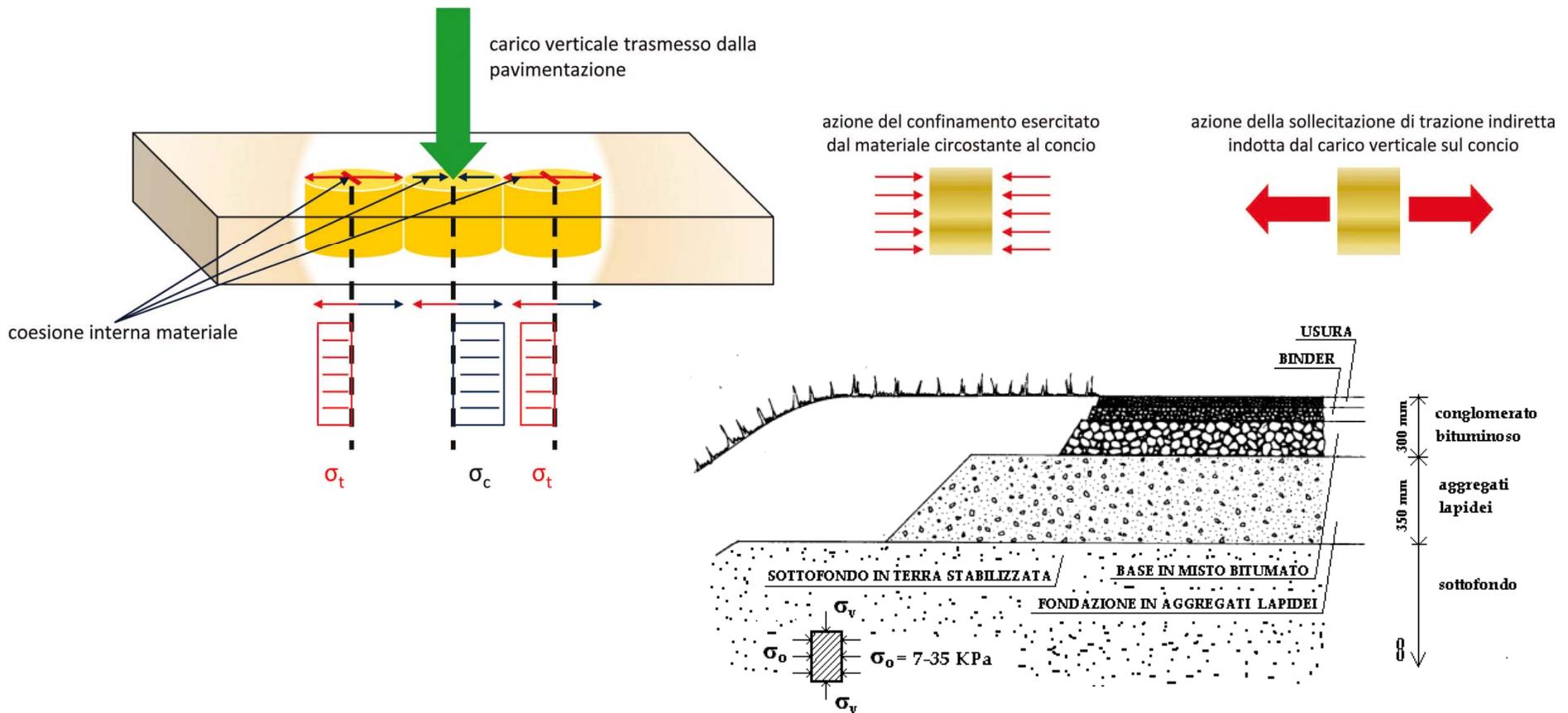
|   |        |                         |          |                        |      |                    |
|---|--------|-------------------------|----------|------------------------|------|--------------------|
| Energia di costipamento:                  | AASHTO | modificato              | T/180-57 | Volume della fustella: | 2124 | [cm <sup>3</sup> ] |
| Inerte trattenuto al crivello 5 UNI 2332: | 0,0    | (% in massa sul totale) |          | Ø fustella:            | 152  | [mm]               |

| Calce (CaO) [%] | contenuto d'acqua [%] | massa umida dell'unità di volume [g/cm <sup>3</sup> ] | massa secca dell'unità di volume [g/cm <sup>3</sup> ] | CBR (24 h) |
|-----------------|-----------------------|---|---|------------|
| 2,5             | 14,6                  | 1,977   | 1,705   | 44         |
|                 | 18,3                  | 2,055   | 1,736   | 63         |
|                 | 20,9                  | 1,992   | 1,647   | 29         |
|                 | 24,3                  | 1,957   | 1,575   | 21         |



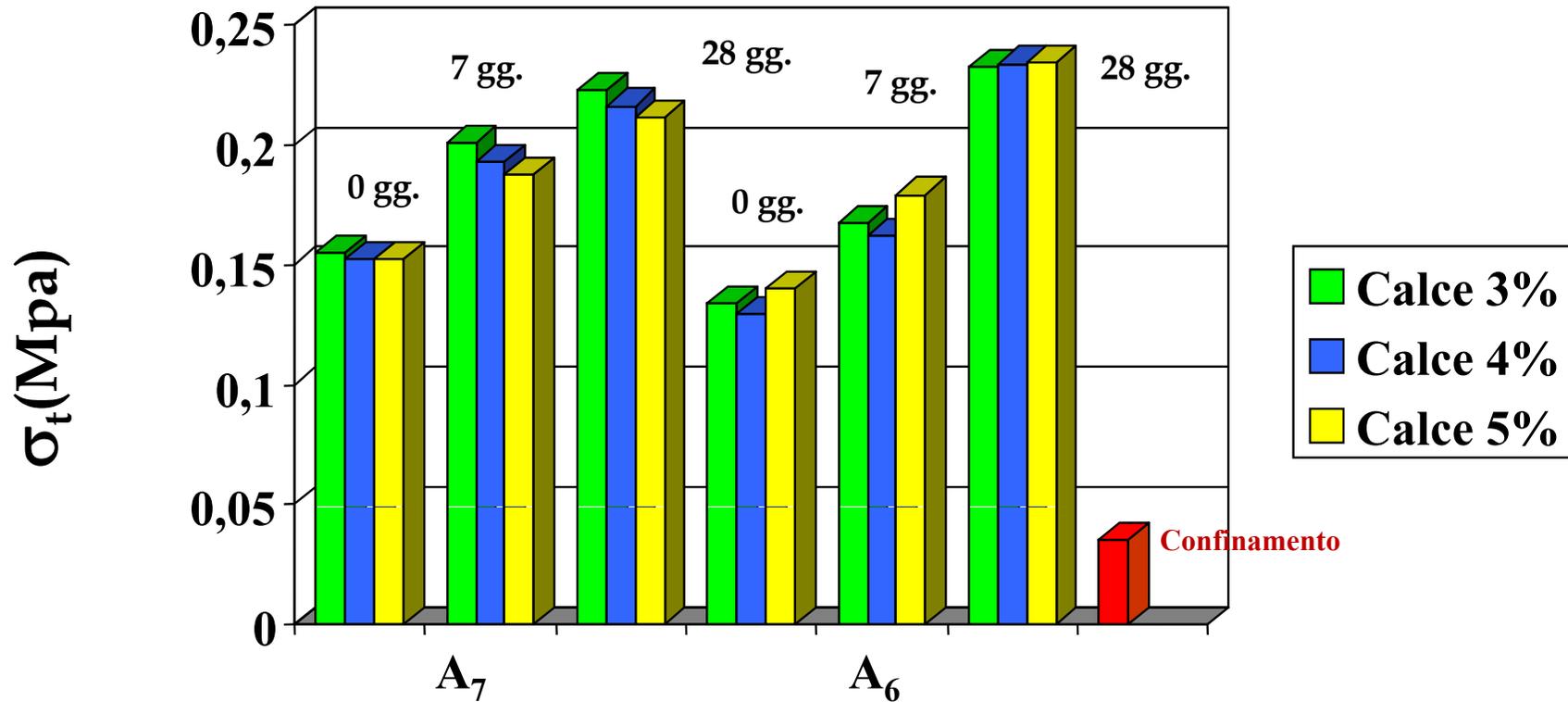


## Pressione di confinamento vs coesione interna



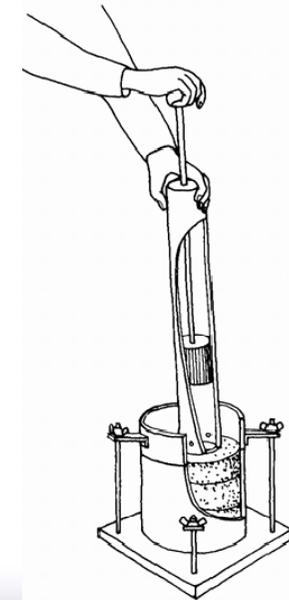
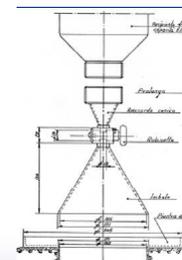
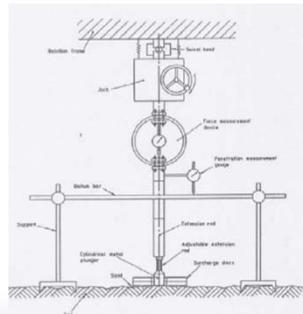


## Pressione di confinamento vs coesione interna



## Controllo della compattazione

- ✓ **Prova Proctor & Misura della densità in sito:** si esegue una prova proctor sul materiale miscelato e si confronta la densità con il valore misurato e con quello ottenuto nel mix design.
- ✓ **Prova CBR in Sito**





UF  
UNIVERSITY of  
FLORIDA

# Mix Design

University of Parma

## Definizione del contenuto ottimale di calce

Miscela di primo tentativo con una percentuale di calce pari  
a C.I.C. + 0,5% sul peso del terreno

**Test: CBR Test dopo 7gg in aria + 4gg in acqua & test di rigonfiamento**

provini confezionati con umidità ottima Proctor e compattati con metodo Proctor  
(standard)

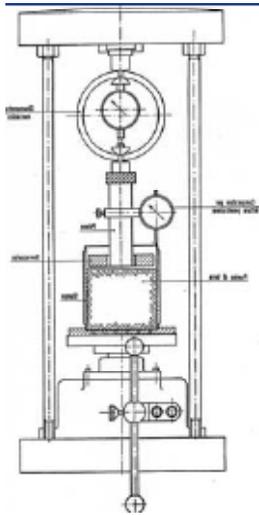
Questi due test danno informazioni in merito alle caratteristiche meccaniche ed all'efficacia  
del trattamento a calce:

1. dopo 7gg la maggior parte delle reazioni tra terra e calce sono avvenute (rimane solo la fase di indurimento delle reazioni pozzolaniche): se dopo uteriorigg in acqua la miscela ha un accettabile/buono indice CBR, con buona probabilità la miscela garantirà buone prestazioni anche nel lungo periodo;
2. se dopo 4gg in acqua non si hanno significativi incrementi di volume (superiori a If - the mix after 4 days in water not show a significant increase of volume (<1%, in %) significa che il quantitativo di calce è sufficiente a stabilizzare tutta l'argilla

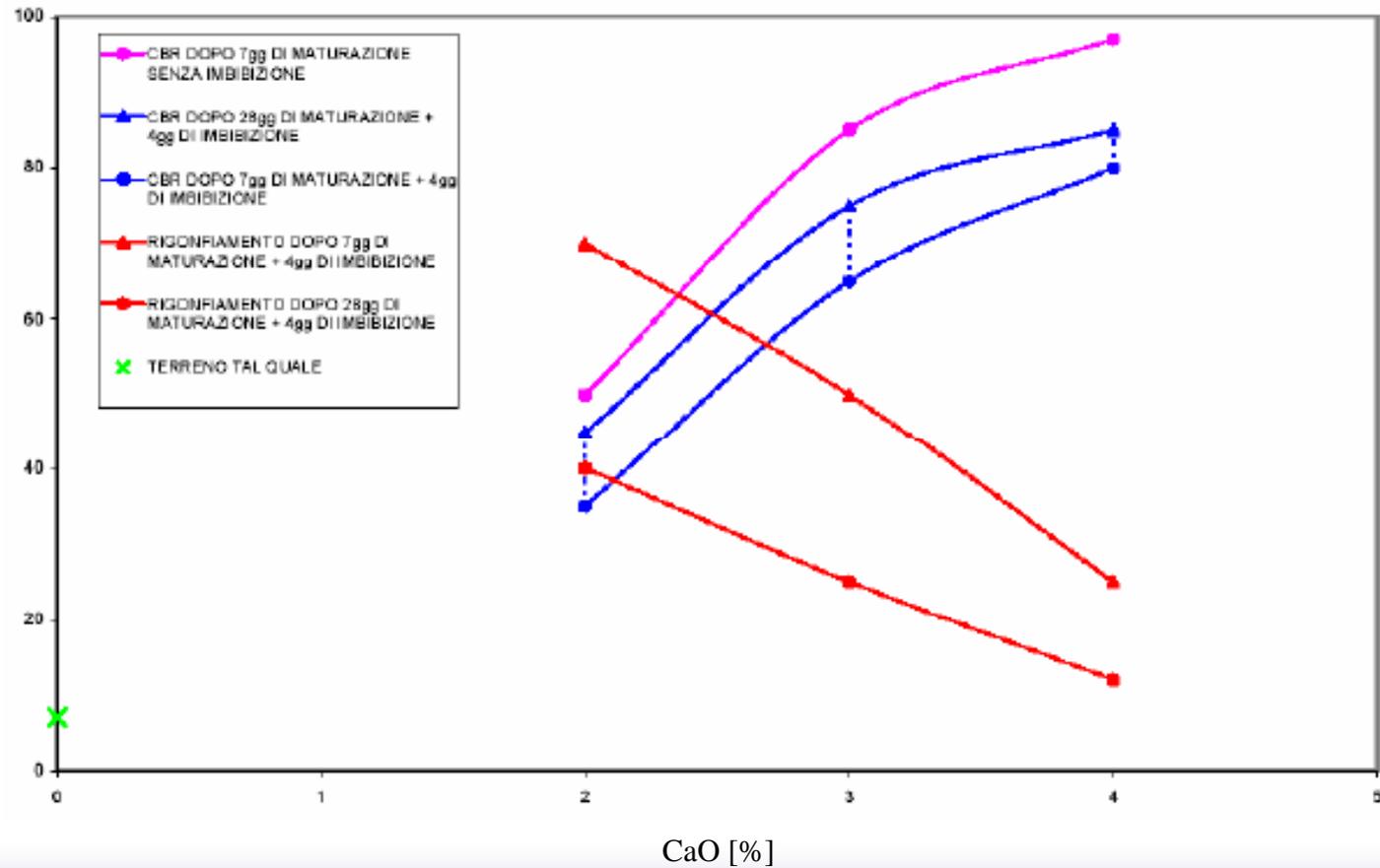


# Mix Design

## CBR Penetration Test (ASTM D1883-05; AASHTO T193)



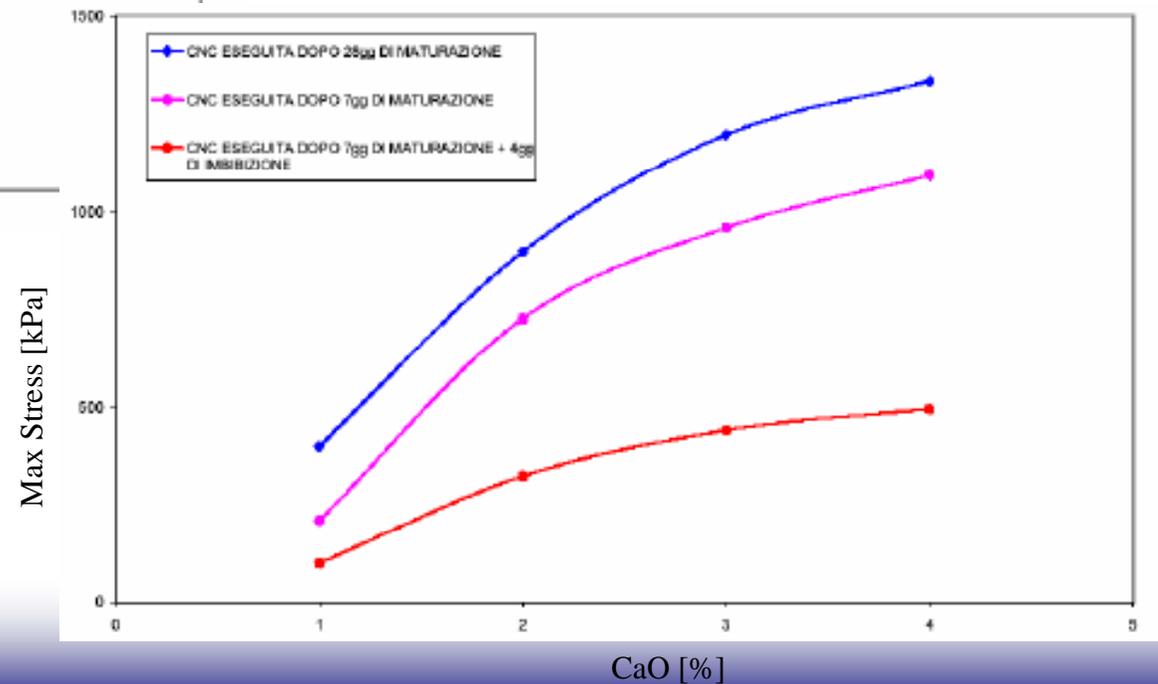
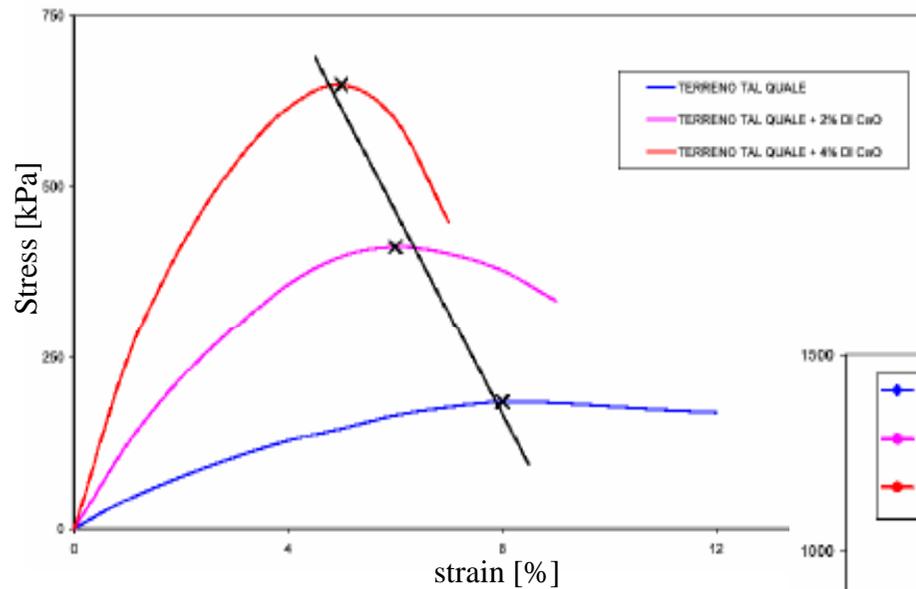
indice CBR [%]



# Mix Design

University of Parma

## Prove di compressione ad espansione laterale libera



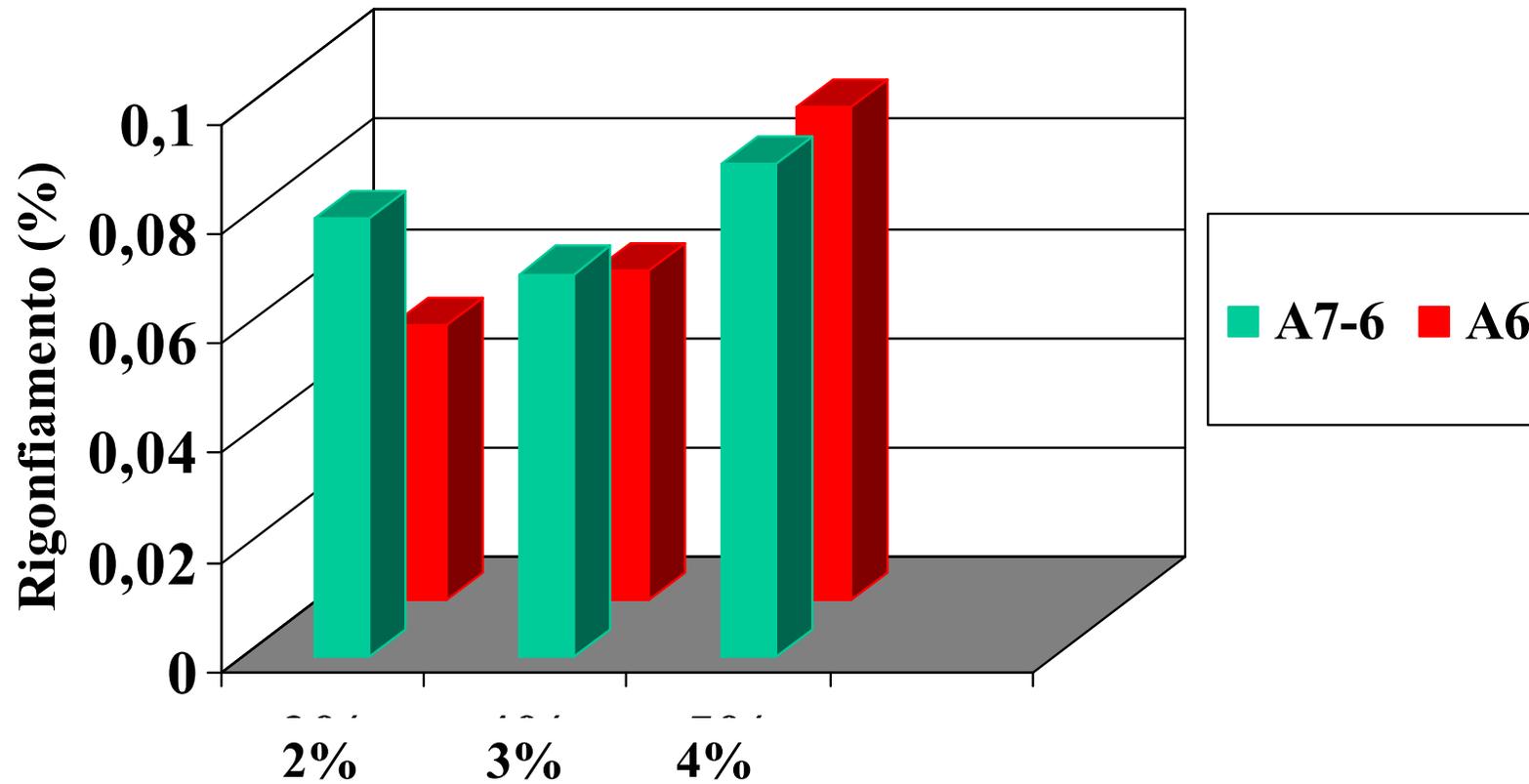
CaO [%]



# Mix Design

University of Parma

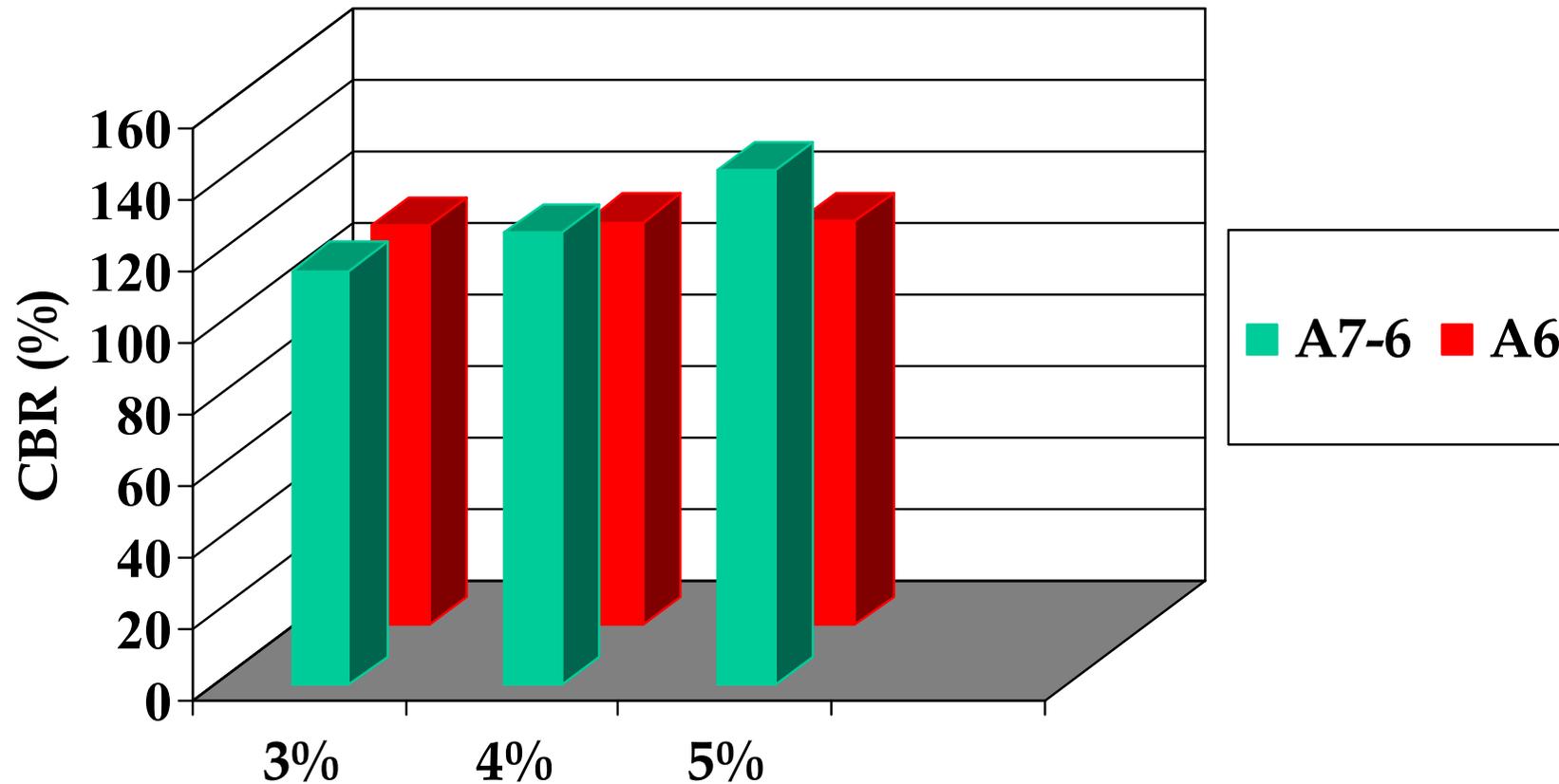
7 gg + 4 in acqua





# Mix Design

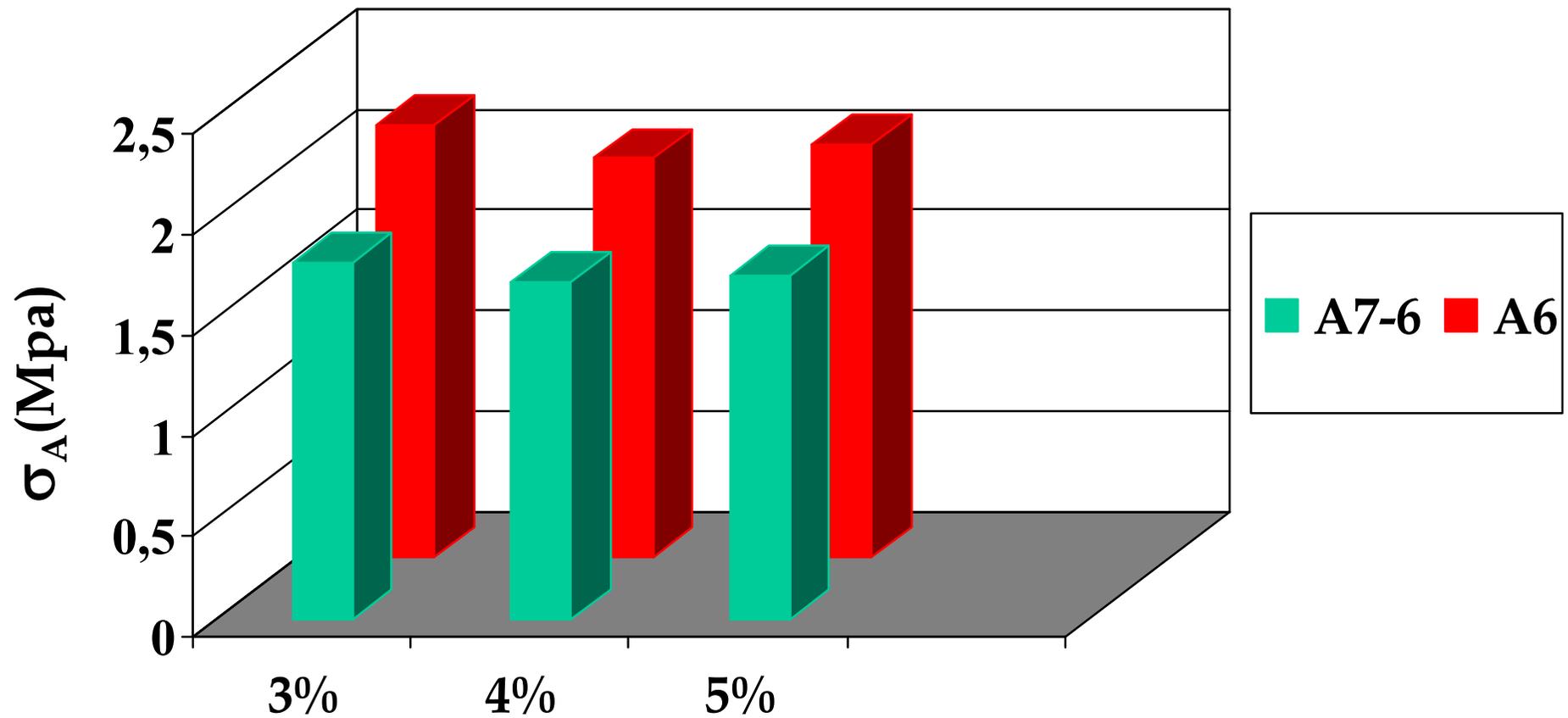
7 gg





# Mix Design

28 gg



# Mix Design

## Definizione del contenuto ottimale di calce

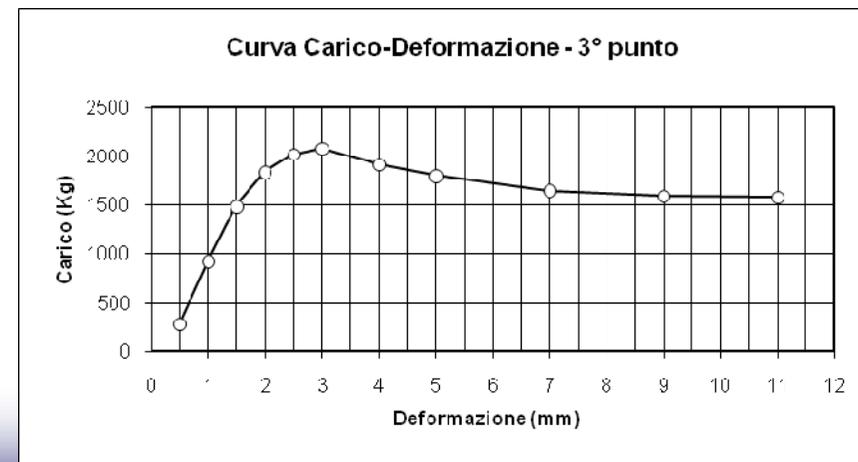
Miscela di primo tentativo con una percentuale di calce pari a C.I.C. + 0,5% sul peso del terreno

Test: CBR Test dopo 7gg in aria + 4gg in acqua & test di rigonfiamento

provini confezionati con umidità ottima Proctor e compattati con metodo Proctor (standard)

**Rigonfiamento 96<sup>h</sup> argilla stabilizzata: 0.14%**  
**argilla non stabilizzata: 13.7%**

**Indice CBR 150%**



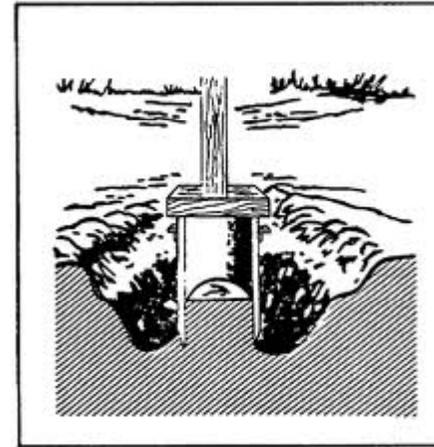
## Controllo di miscelazione e compattazione

### Prova CBR & Rigonfiamento

Si preleva un campione di terreno infiggendo una fustella CBR e si esegue una prova CBR dopo immersione e la misura del rigonfiamento.

**Se il provino rigonfia o non è stata distribuita abbastanza calce oppure non è stata ben miscelata**

**Se il valore CBR è basso potrebbe essere insufficiente**





# Controllo Qualità

## Controllo di miscelazione



### Linee Guida CSA Min. Infratrature [CIRS]

Il numero di passate dipende dalla natura del terreno trattato e dal suo grado di umidità. Si deve garantire un sufficiente sbriciolamento della terra, fino ad ottenere una colorazione uniforme ed una dimensione massima delle zolle non superiore a 40 mm per le bonifiche dei piani di appoggio dei rilevati, di 30 mm per gli strati di rilevato e di 20 mm per gli strati di sottofondo. Inoltre, nel caso di miscele per strati di rilevato si deve verificare che l'80% del terreno, ad esclusione delle porzioni lapidee, risulti passante al setaccio con apertura di 4,76 mm.



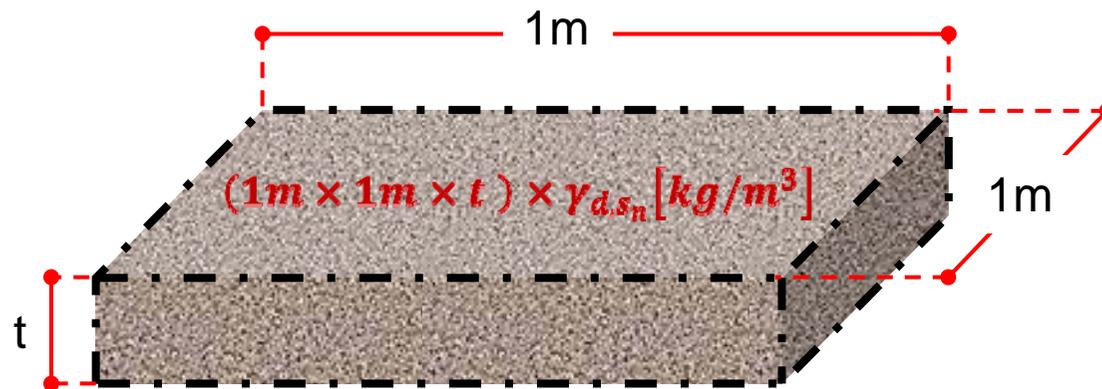
# Mix Design

University of Parma

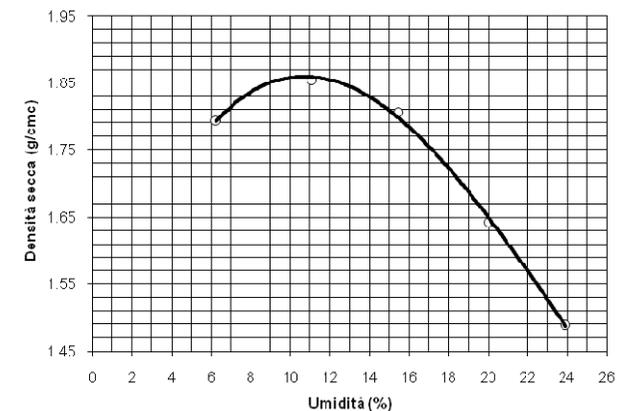
## Determinazione del quantitativo di calce da stendere

Test: prova Proctor (standard) sul terreno originale tal quale per conoscerne la densità e convertire in  $\text{kg/m}^2$  la quantità di calce espressa in percentuale del peso del terreno.

$$\text{calce} [\text{kg/m}^2] = \text{peso del terreno} \times \% \text{calce}$$



t = spessore dello strato compattato(30 cm)



# Mix Design

## Determinazione del quantitativo di calce da stendere

La quantità di calce definita col mix design è relativa al contenuto d'acqua corrispondente alla densità massima Proctor ( $w_{opt}$ ) ma se il quantitativo naturale d'acqua del terreno è troppo elevato occorre aumentare opportunamente



# Controllo Qualità

## Controllo del quantitativo di calce stesa



**Piatto da 1m x 1m oppure 50cm x 50cm (da moltiplicare per 4)**

# Controllo Qualità

## Controllo dell'umidità di lavorazione



$$W_{ott} \pm 2\%$$

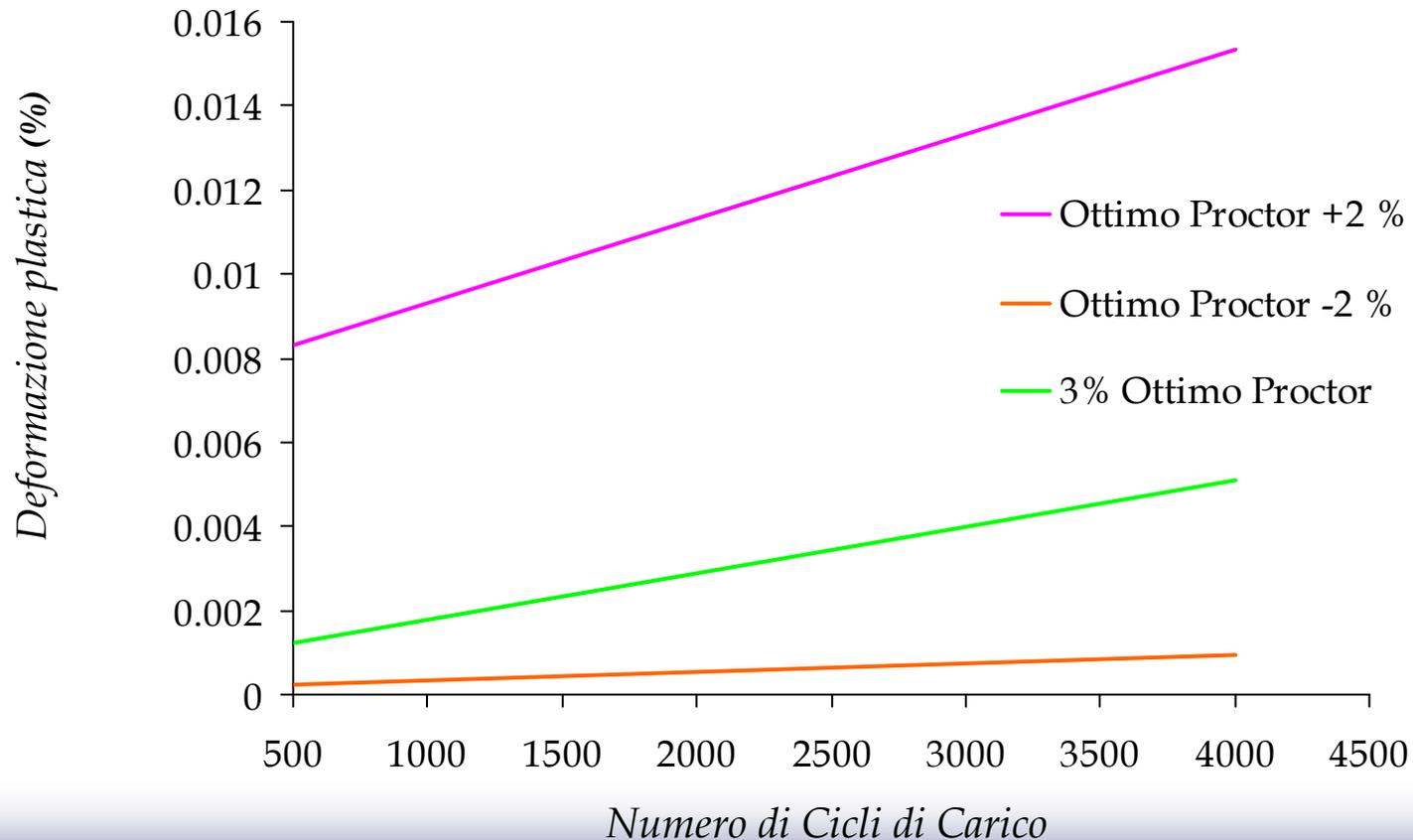


# Stabilizzazione a calce

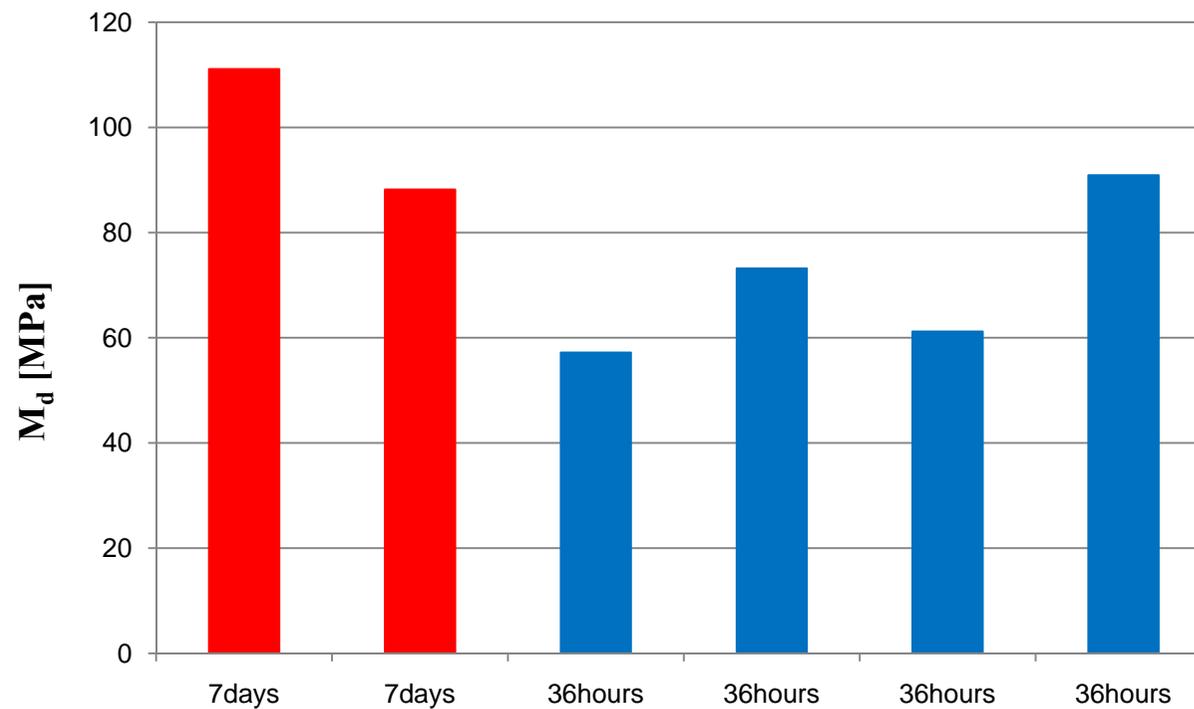
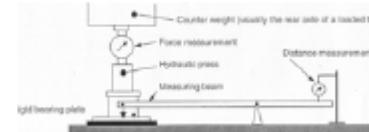
## Effetto dei carichi dinamici

Creep dinamico - test a 28 giorni dopo la compattazione

(A.A.S.H.T.O. modificata)



## Verifica della portanza (prove di carico su piastra)



I HAVE A QUESTION

?

WHY?  
HOW?  
WHEN?

WHY?  
WHEN?



?



# Prove geotecniche di laboratorio ed in sito: dallo studio preliminare della miscela ai controlli finali

CONVEGNO

La stabilizzazione dei terreni con calce

Pesaro 29/04/11

Dott. Ugo Sergio Orazi

Laboratorio Geomeccanico Orazi





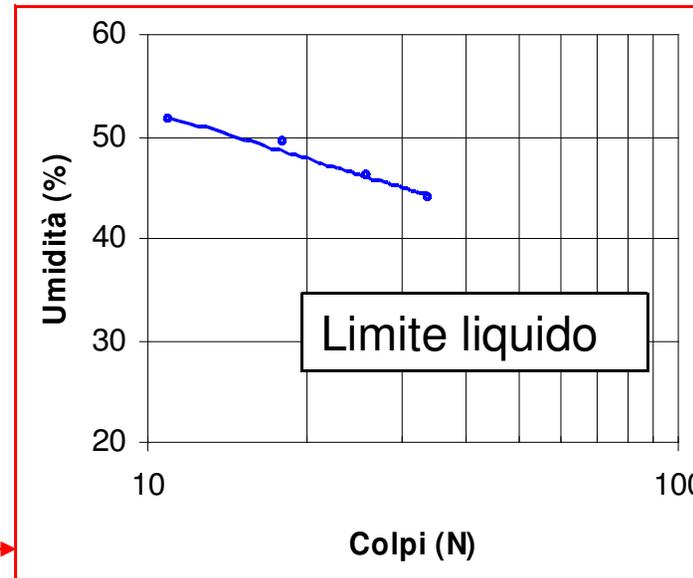
# Schema intervento

- Analisi preliminari
- Studio della miscela: prove “classiche”
- Studio della miscela: prove integrative
- Controlli in sito



# ANALISI PRELIMINARI

# Limiti di consistenza



Cucchiaio di Casagrande



Limite plastico

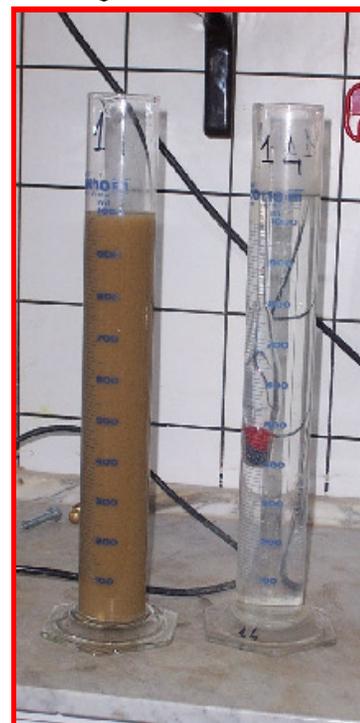
# Analisi granulometrica



Setacciatura



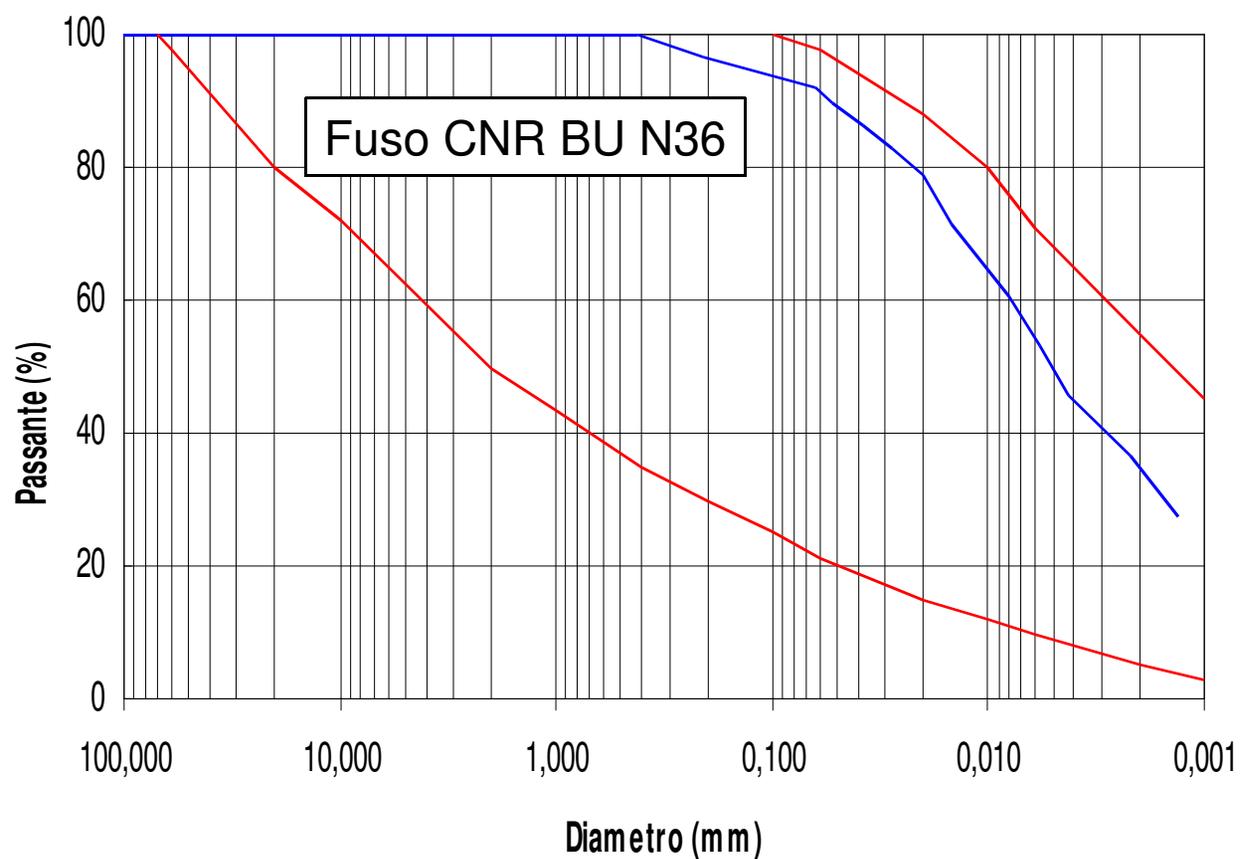
Separazione frazione fine



Sedimentazione

5

# Analisi granulometrica



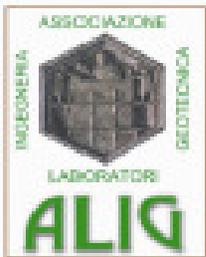
# Classificazione UNI 10006



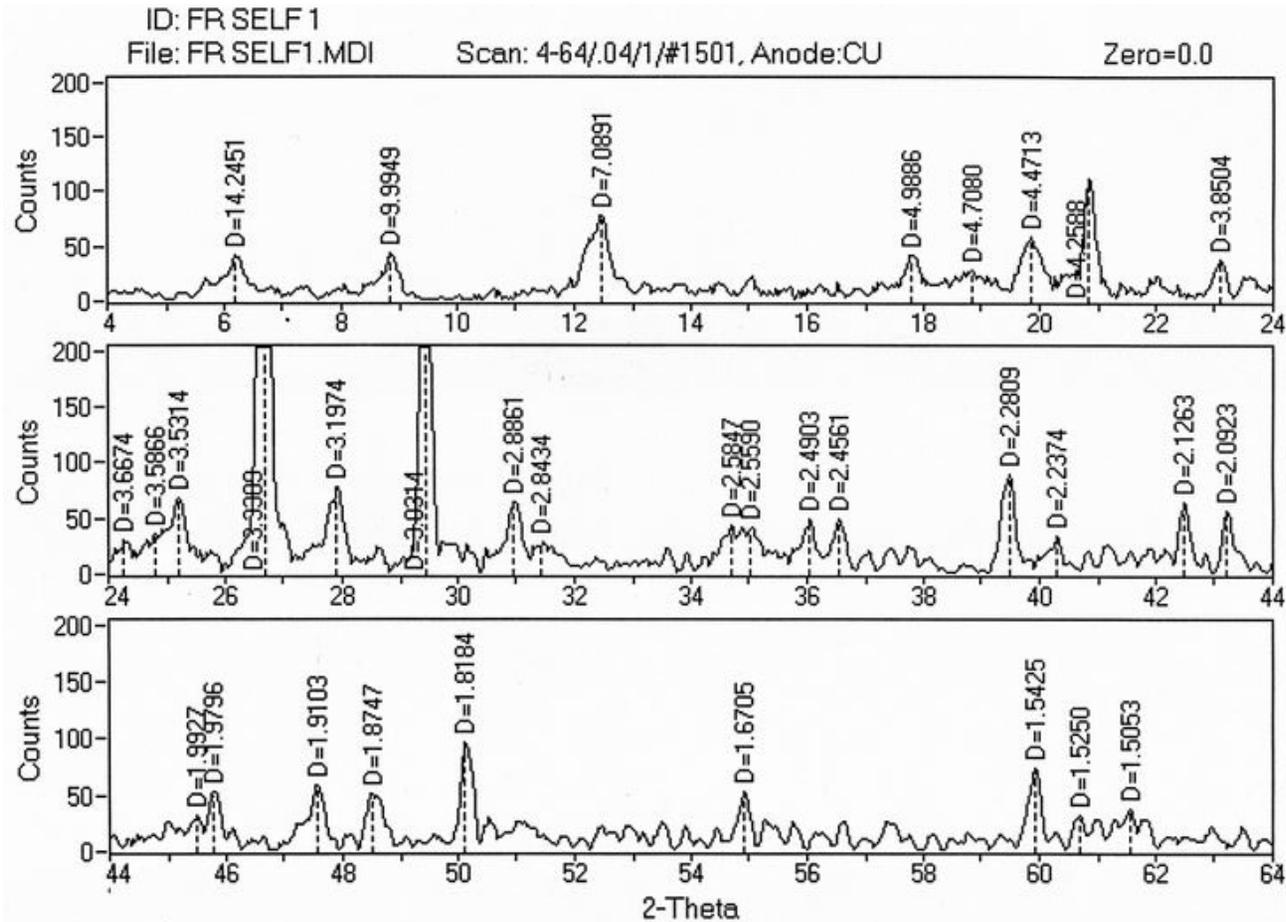
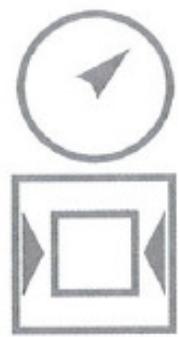
| GRUPPO              | A1   |      | A3   | A2   |      |      |      | A4   | A5   | A6   | A7   |
|---------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| SOTTOGRUPPO         | A1-a | A1-b |      | A2-4 | A2-5 | A2-6 | A2-7 |      |      |      |      |
| GRANULOMETRIA       |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Passante 2,000 mm   | %    | ≤ 50 |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Passante 0,420 mm   | %    | ≤ 30 | ≤ 50 | > 50 |      |      |      |      |      |      |      |
| Passante 0,075 mm   | %    | ≤ 15 | ≤ 25 | ≤ 10 | ≤ 35 | ≤ 35 | ≤ 35 | ≤ 35 | > 35 | > 35 | > 35 |
| LIMITI DI ATTERBERG |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |      |
| Limite liquido      | %    |      |      | ≤ 40 | > 40 | ≤ 40 | > 40 | ≤ 40 | > 40 | ≤ 40 | > 40 |
| Indice Plastico     | %    | ≤ 6  | N.P. | ≤ 10 | ≤ 10 | > 10 | > 10 | ≤ 10 | ≤ 10 | > 10 | > 10 |

Stabilizzabile se passante 0.42 mm > 35%

Stabilizzabile



# Difrattometria



# Altre determinazioni



- Contenuto di sostanze organiche
- Contenuto in solfati
- Contenuto in nitrati
- Determinazione del valore di blu

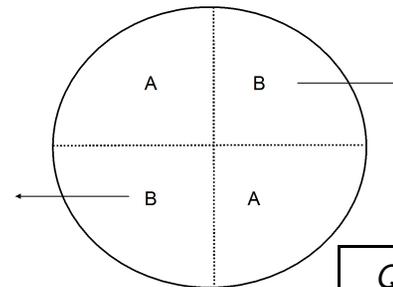
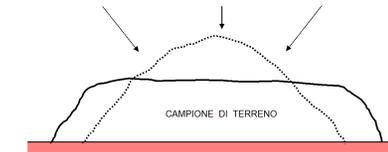


# STUDIO DELLA MISCELA: PROVE “CLASSICHE”

# Preparazione materiale



*Essiccazione*



*Quartatura*



*Frantumazione*

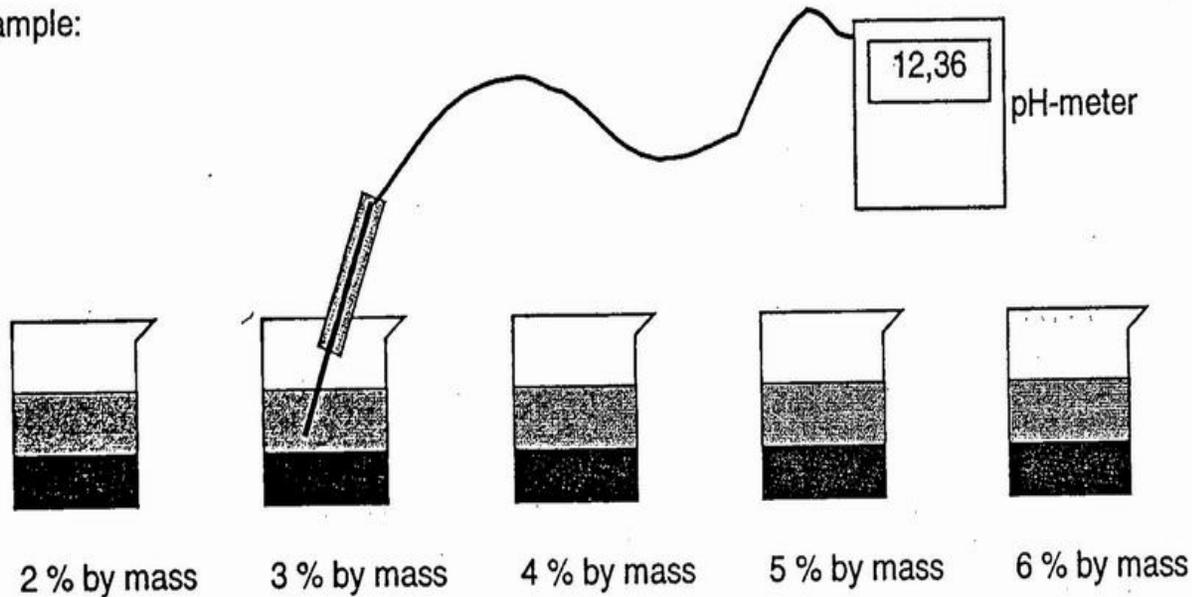


*Selezione*

# Consumo iniziale di calce



Example:



2 % by mass

3 % by mass

4 % by mass

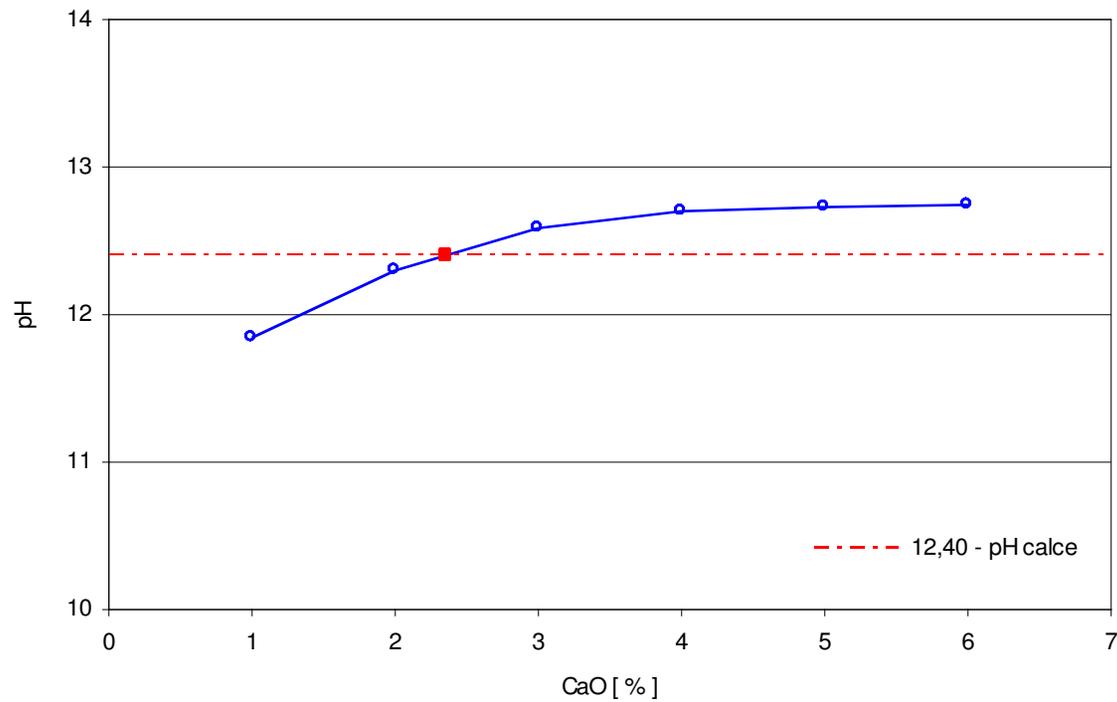
5 % by mass

6 % by mass

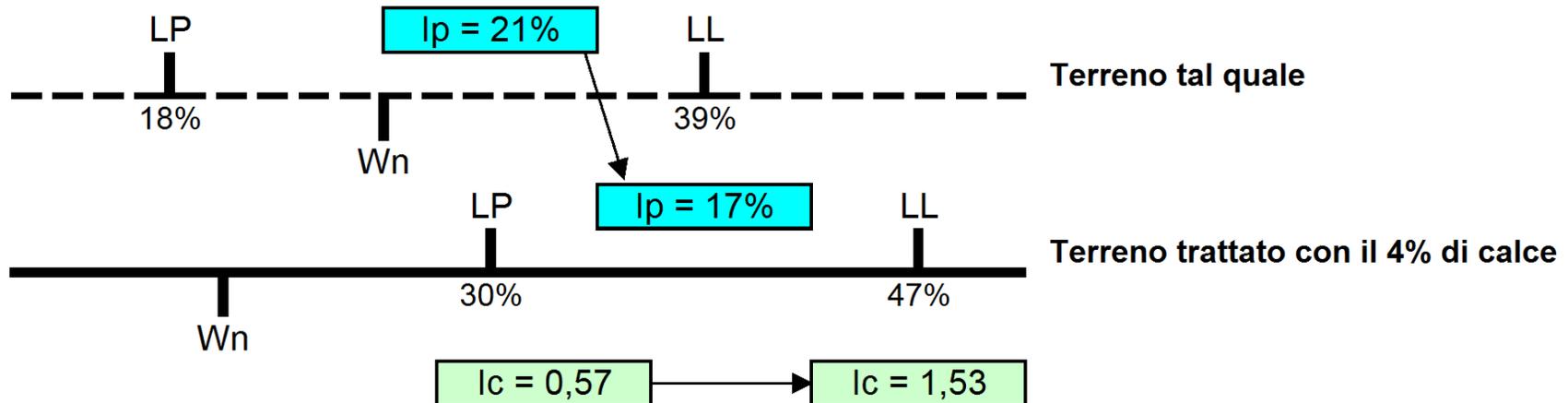
12,36

pH-meter

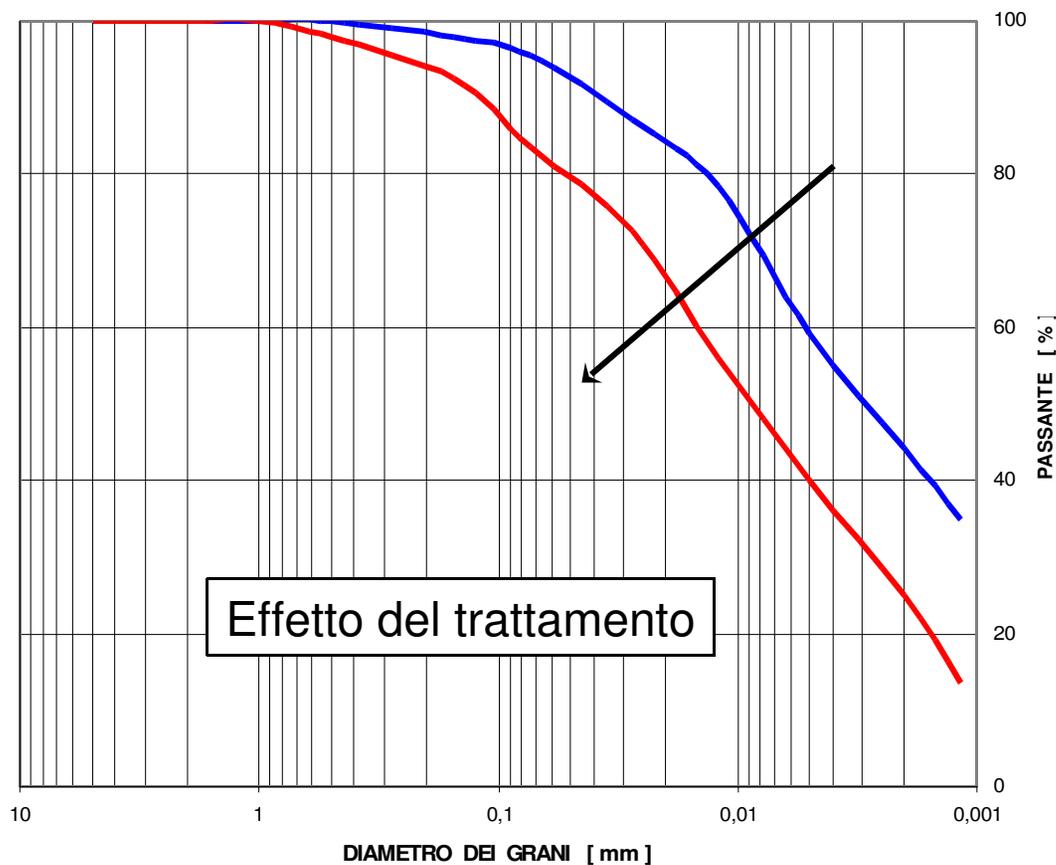
# Consumo iniziale di calce



# Limiti di consistenza



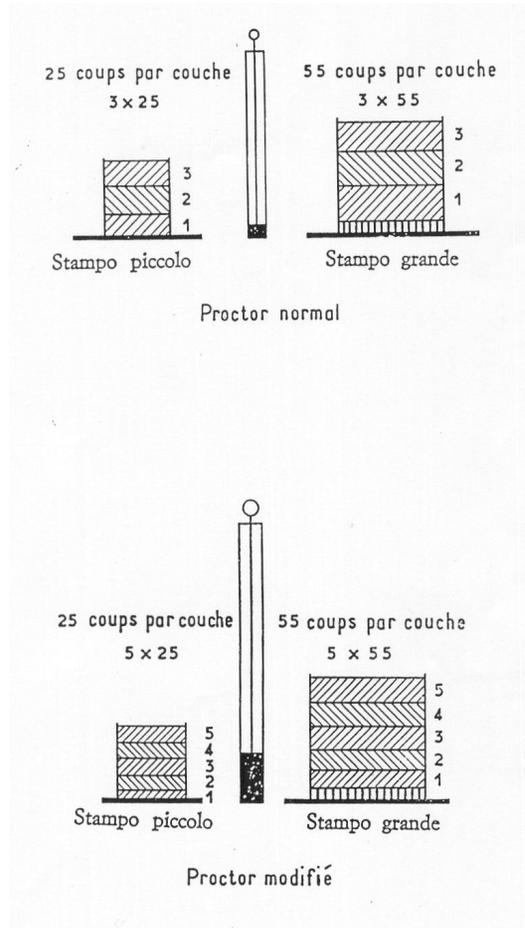
# Analisi granulometrica



Effetto del trattamento



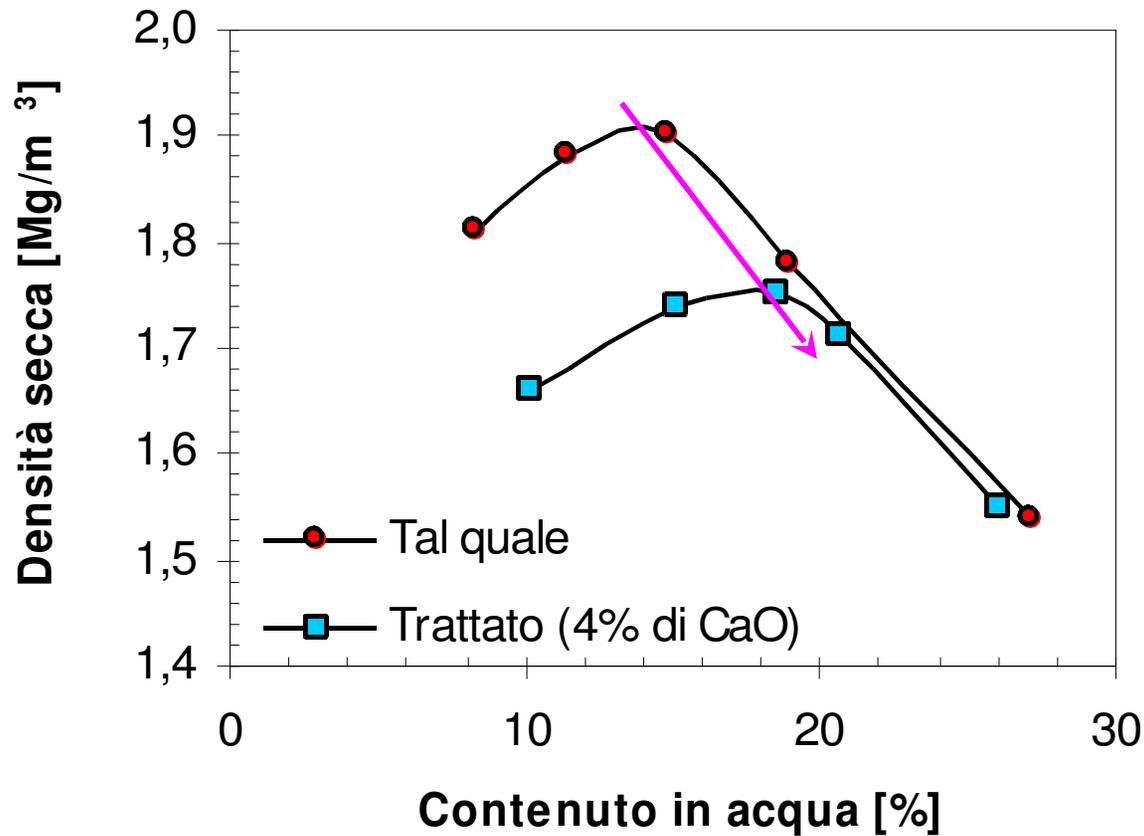
# Compattazione Proctor



# Compattazione Proctor



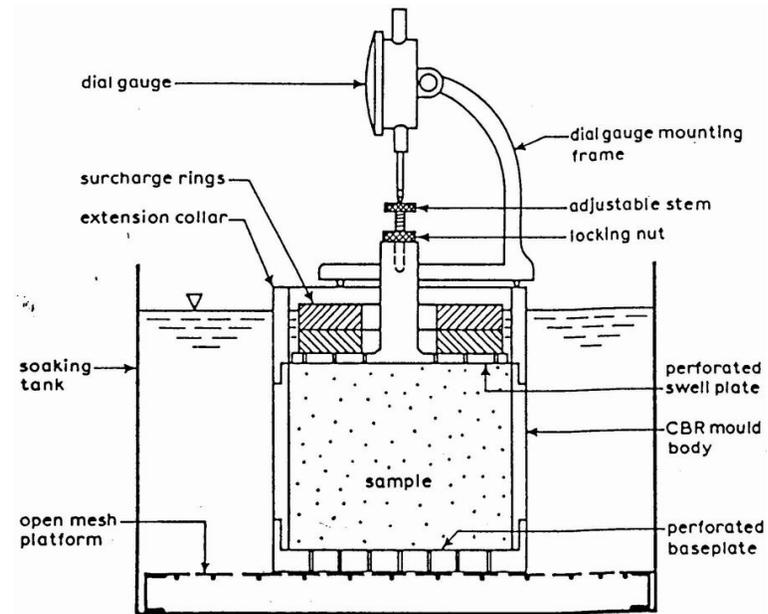
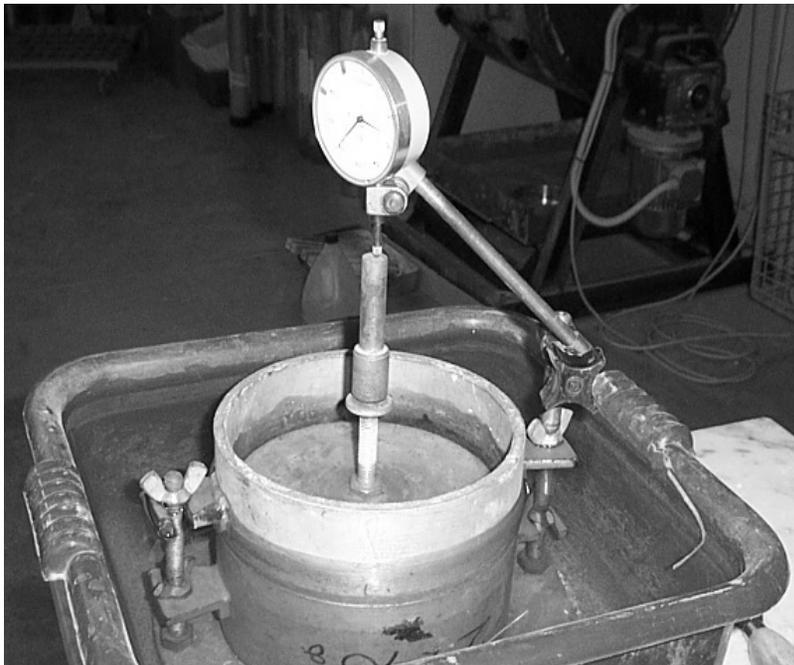
# Compattazione Proctor



# Stagionatura provini

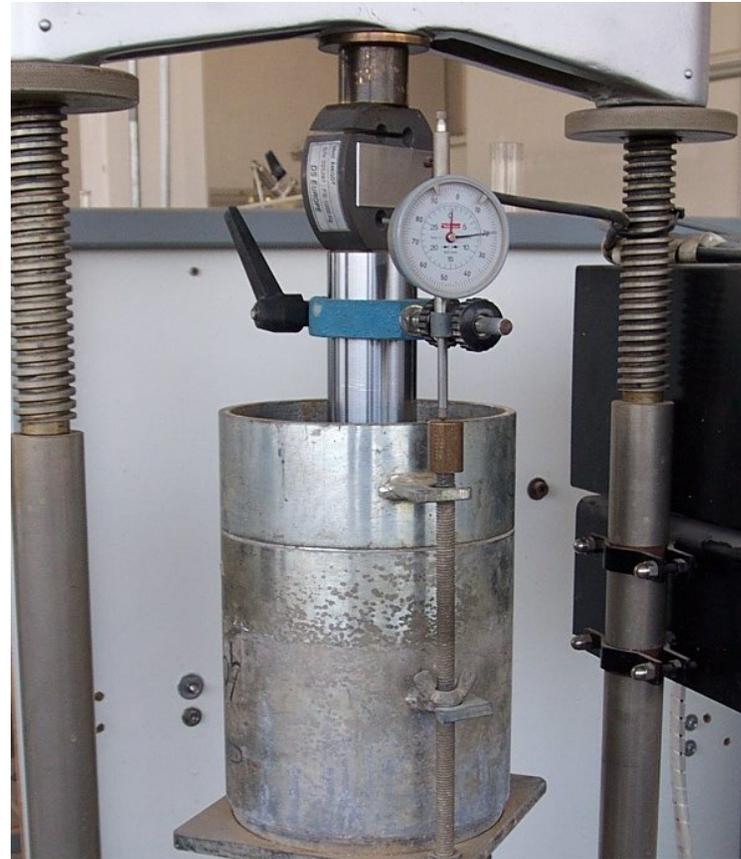
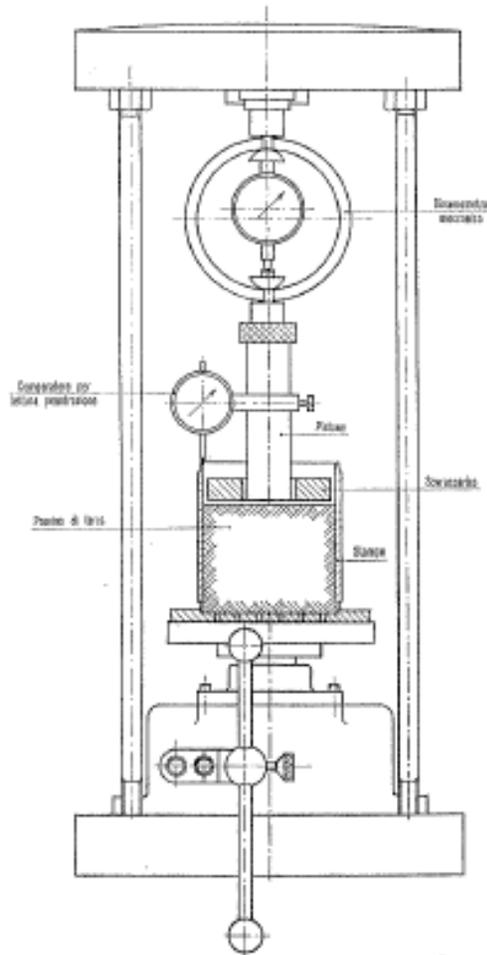


# Rigonfiamento

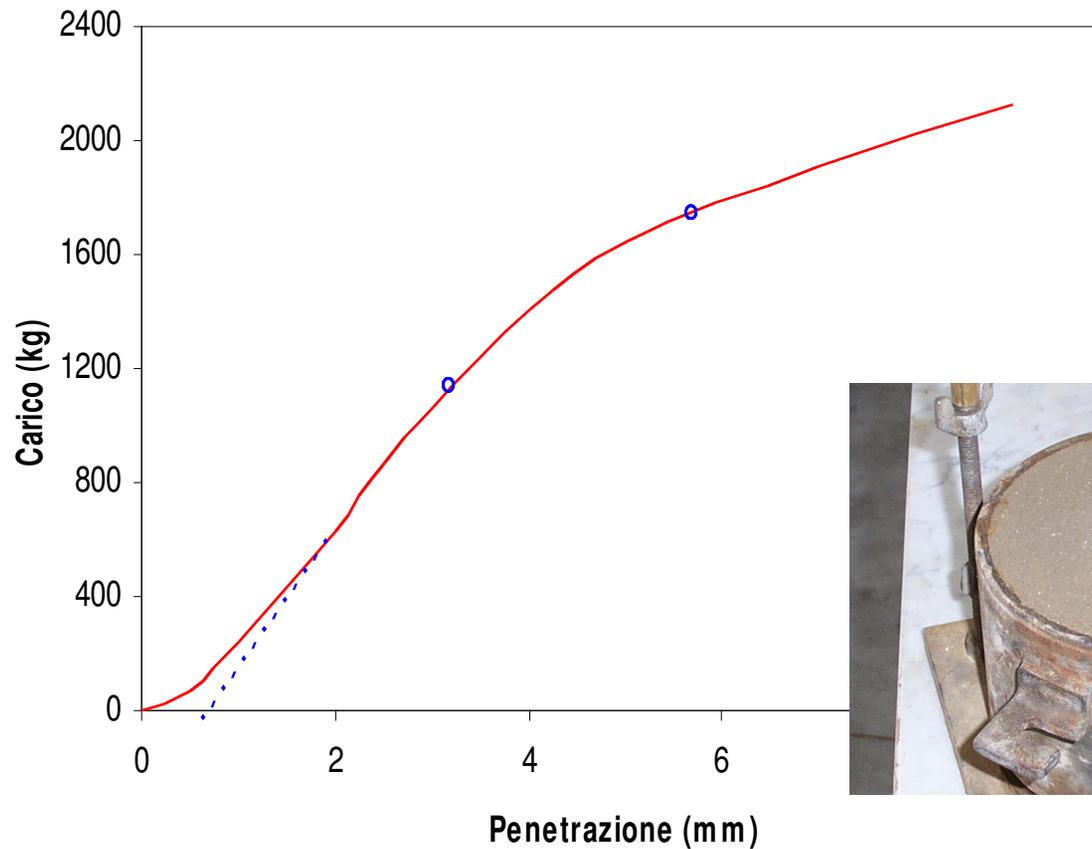


Arrangement for soaking and swelling test

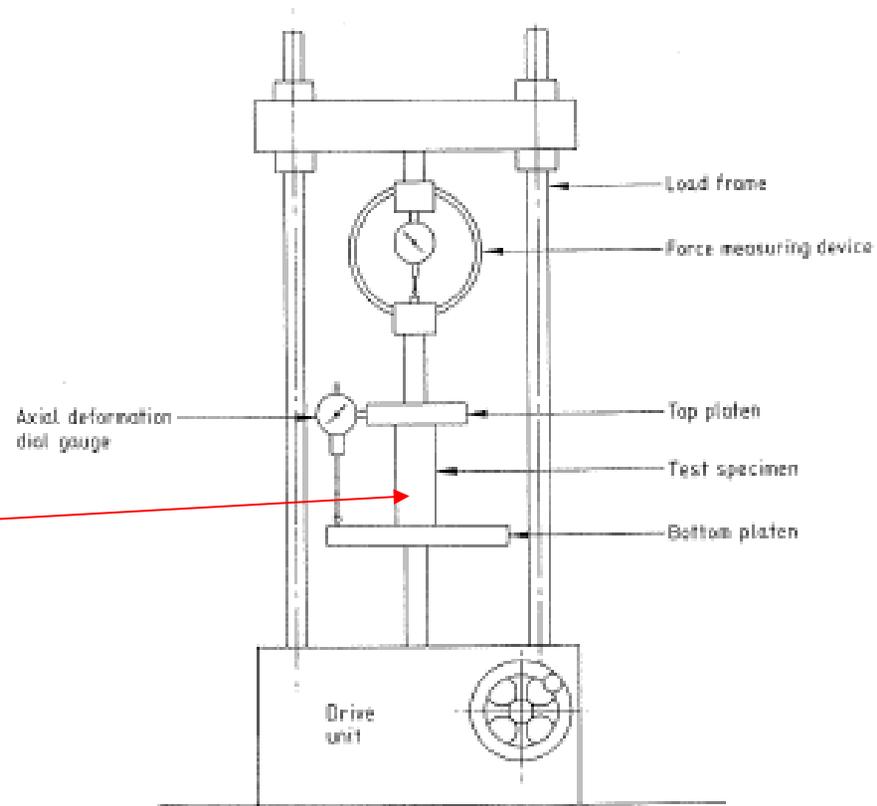
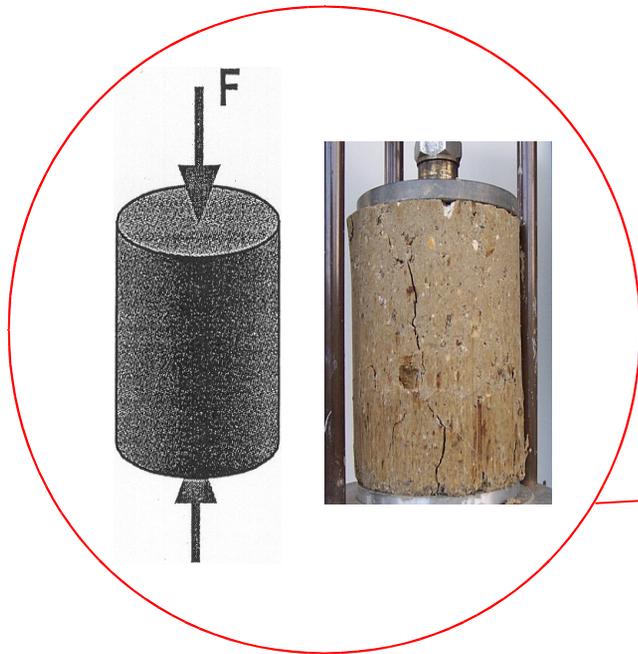
# Penetrazione CBR



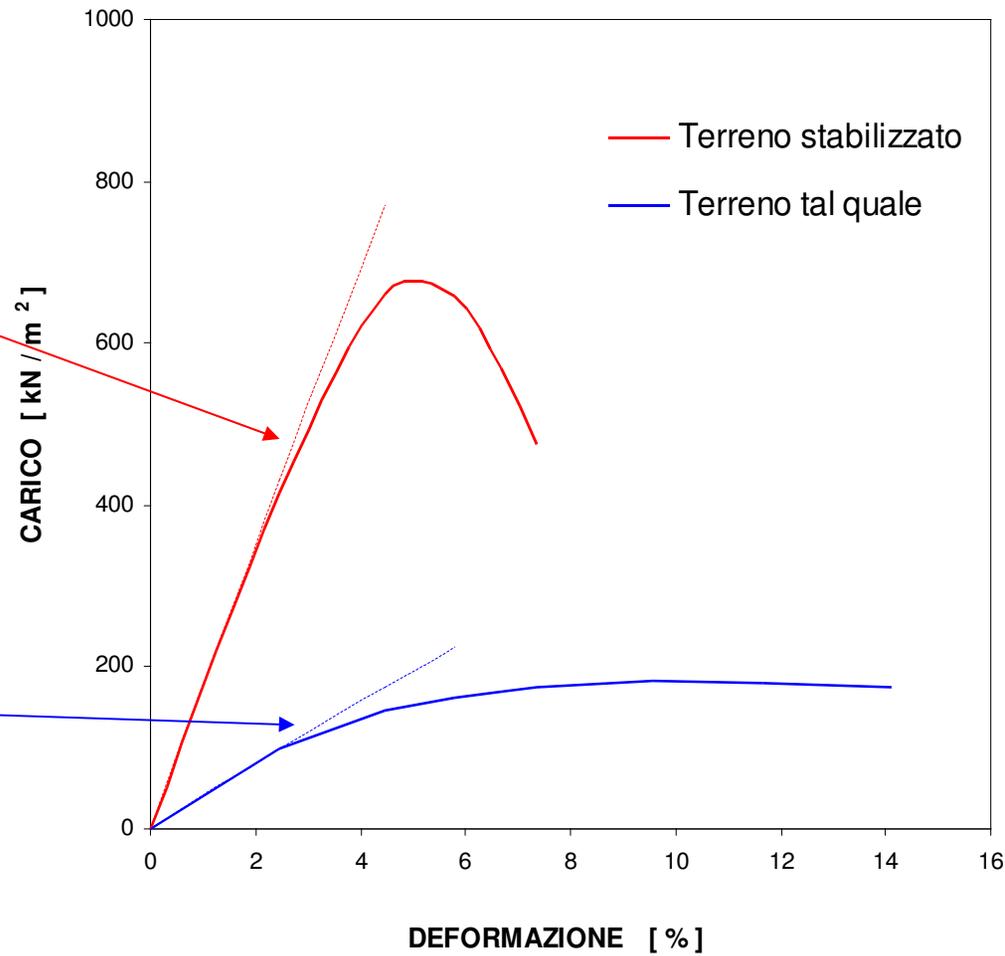
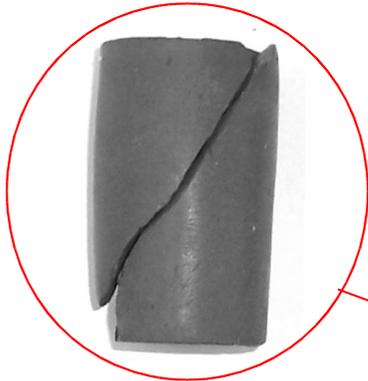
# Penetrazione CBR



# Compressione



# Compressione



DEFORMAZIONE [%]

24

# Parametri richiesti (CNR BU N36)

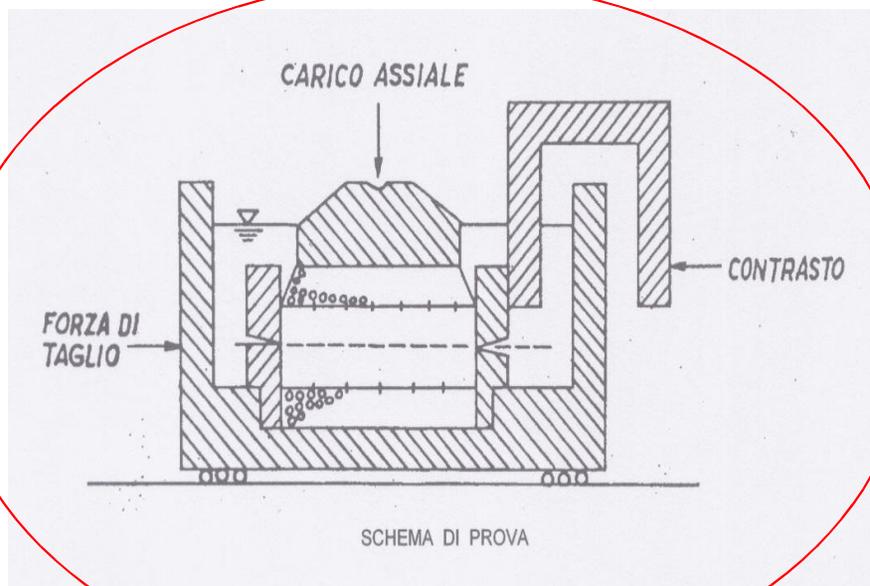


| Parametro     | UM  | Sottofondo | Sovrastruttura |
|---------------|-----|------------|----------------|
| CBR immediato | %   | $\geq 10$  | $\geq 10$      |
| CBR 7+4gg     | %   | $\geq 20$  | $\geq 50$      |
| Rigonfiamento | %   | $\leq 2$   | $\leq 1$       |
| Rc 7gg        | MPa | $\geq 0.3$ | $\geq 0.5$     |
| Rc 28gg       | MPa | $\geq 0.6$ | $\geq 1.0$     |



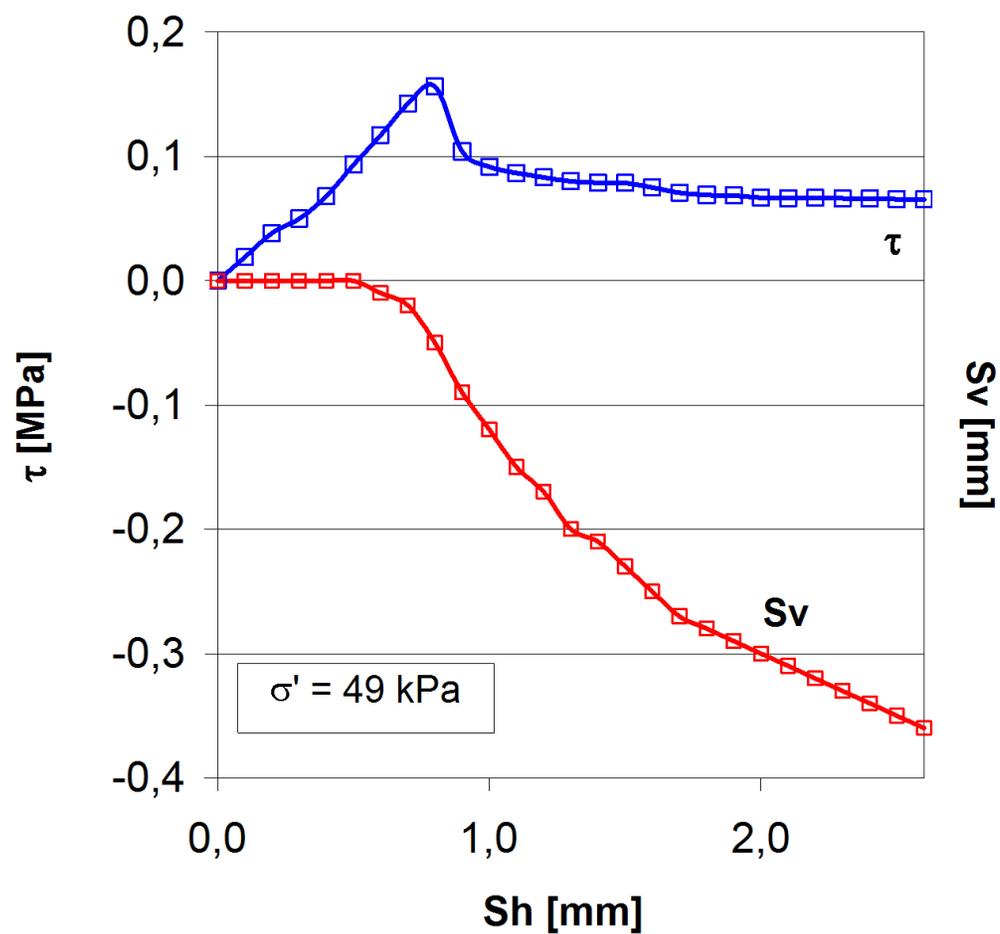
# STUDIO DELLA MISCELA: PROVE INTEGRATIVE

# Taglio diretto

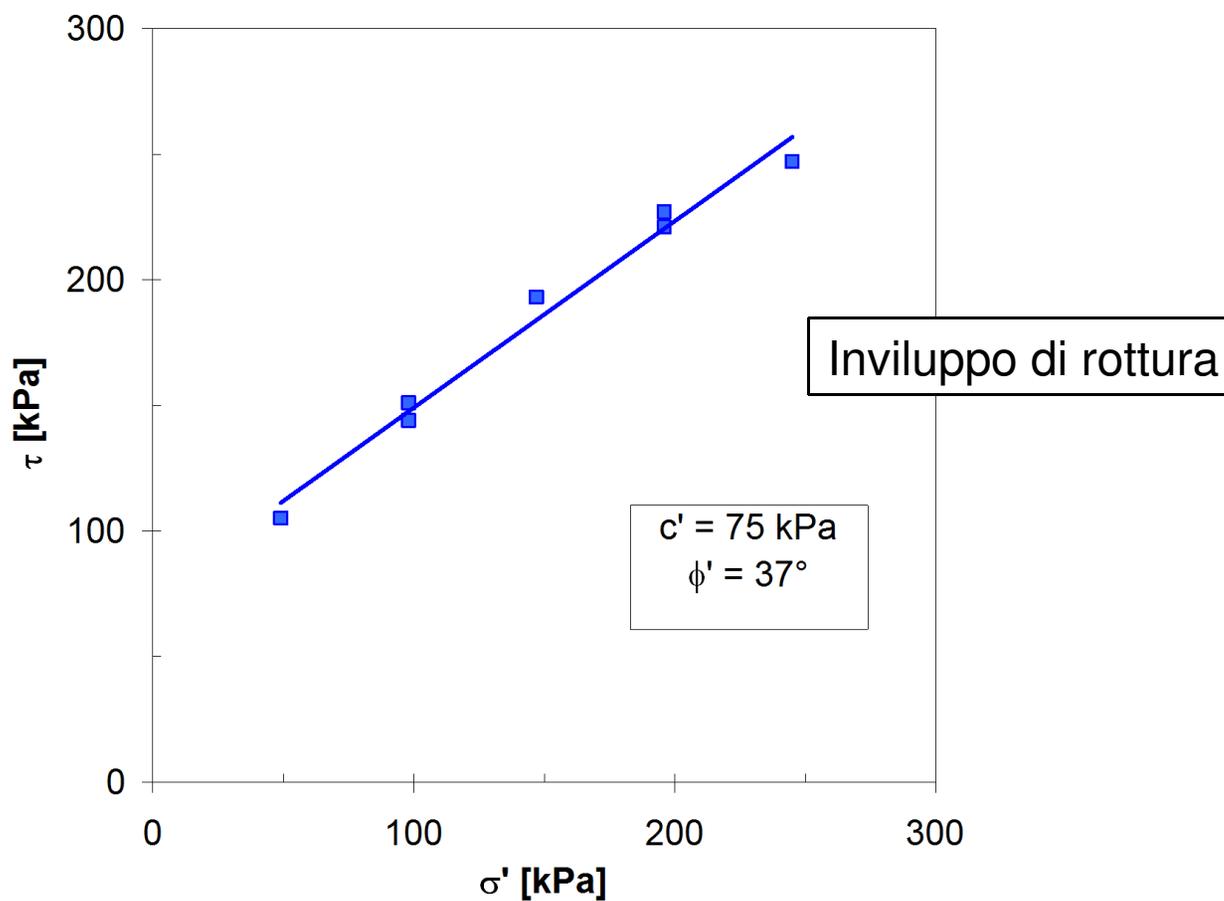


Superfici di taglio

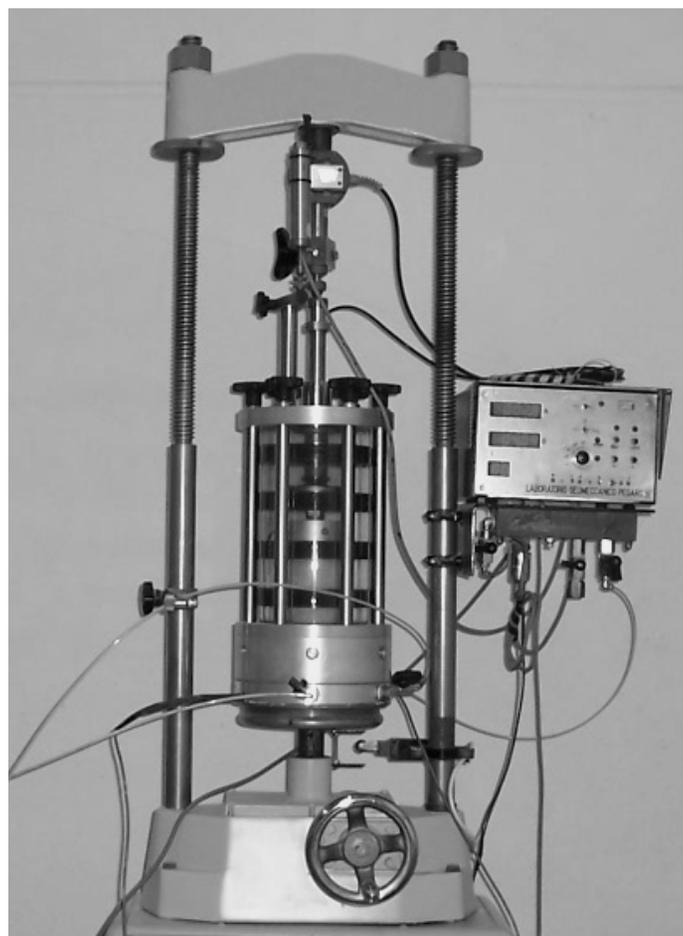
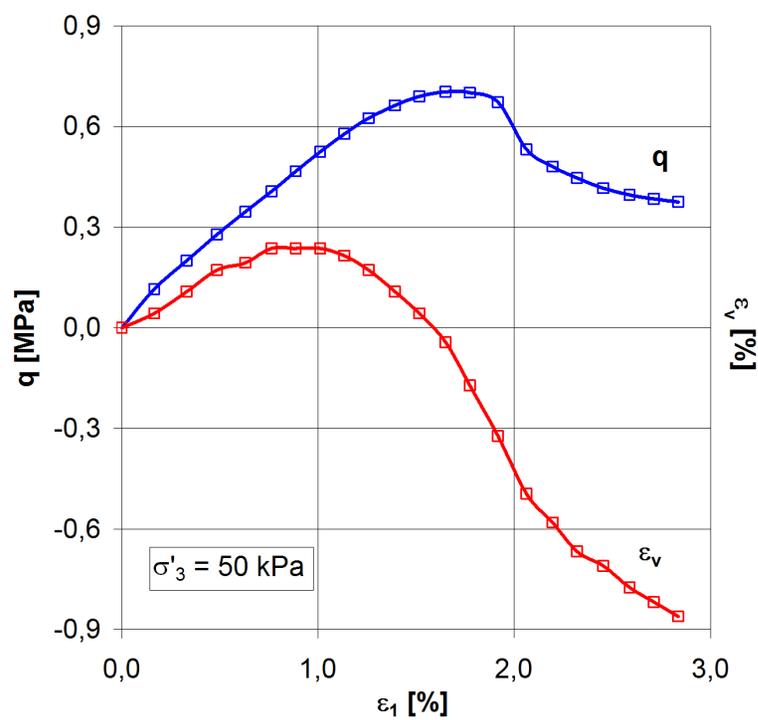
# Taglio diretto



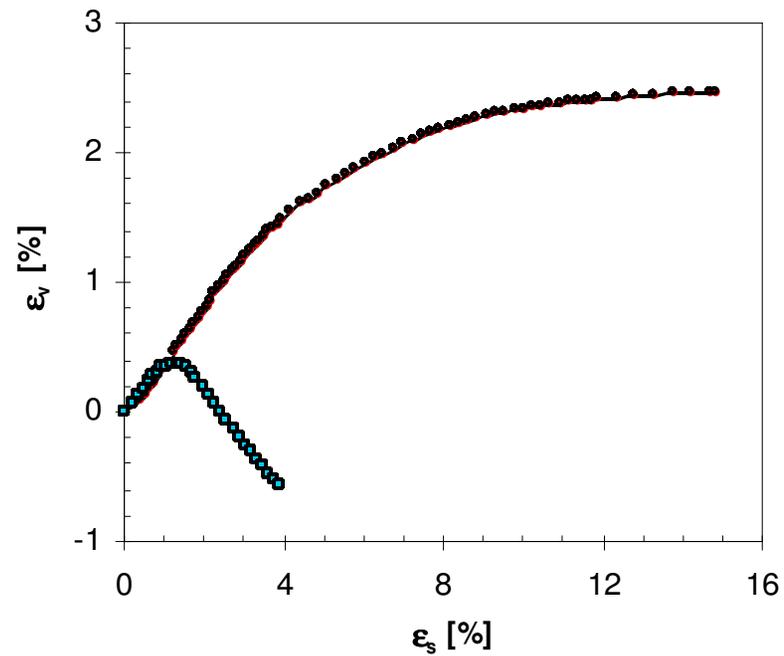
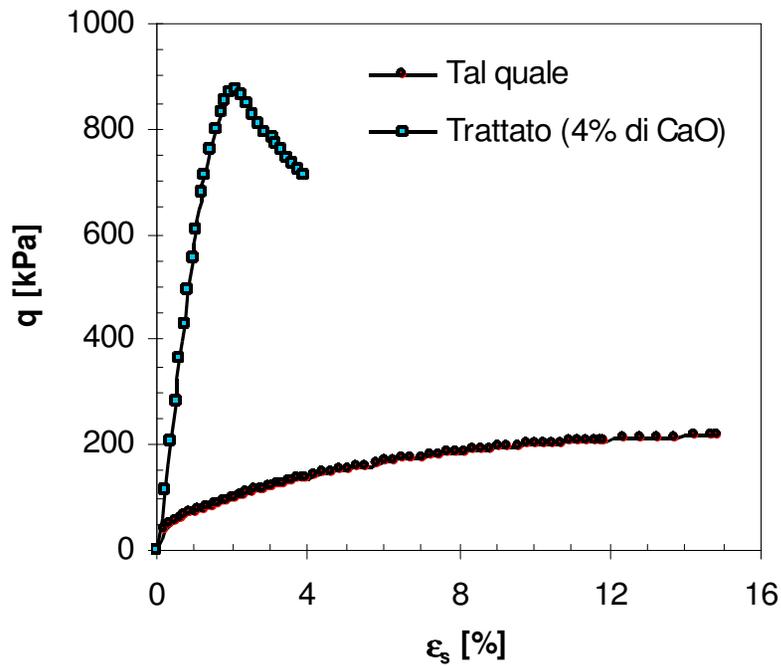
# Taglio diretto



# Triassiale

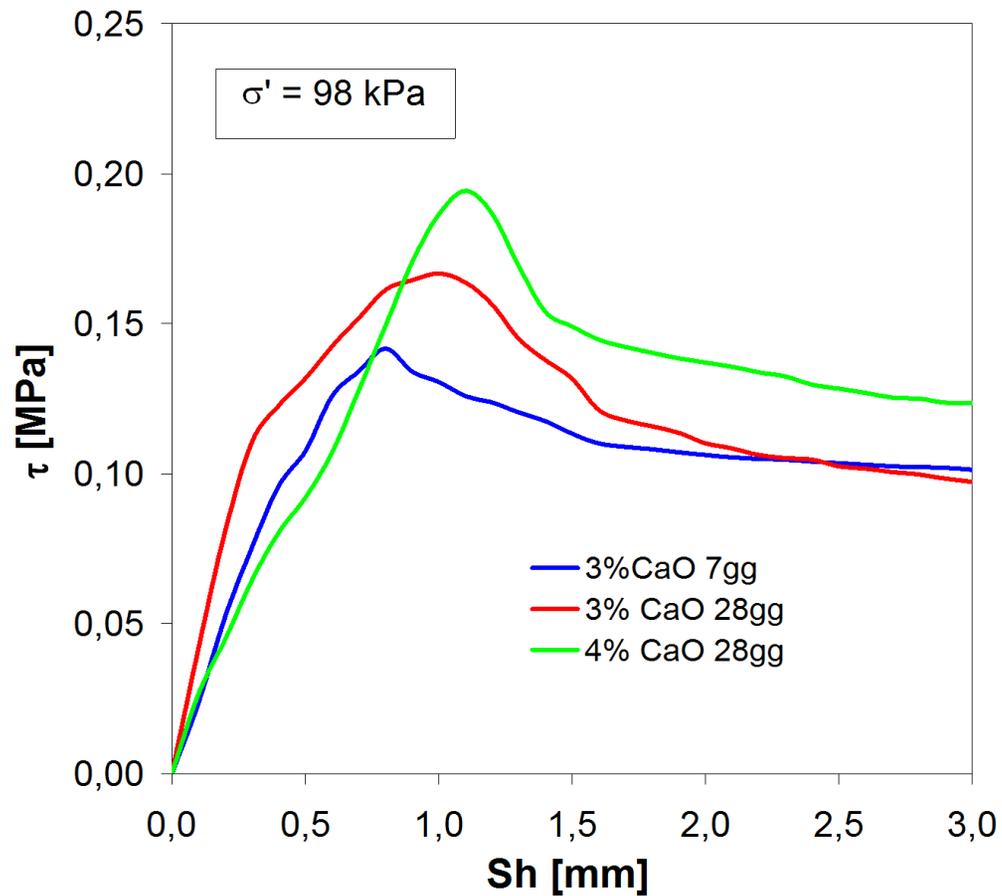


# Effetto del trattamento

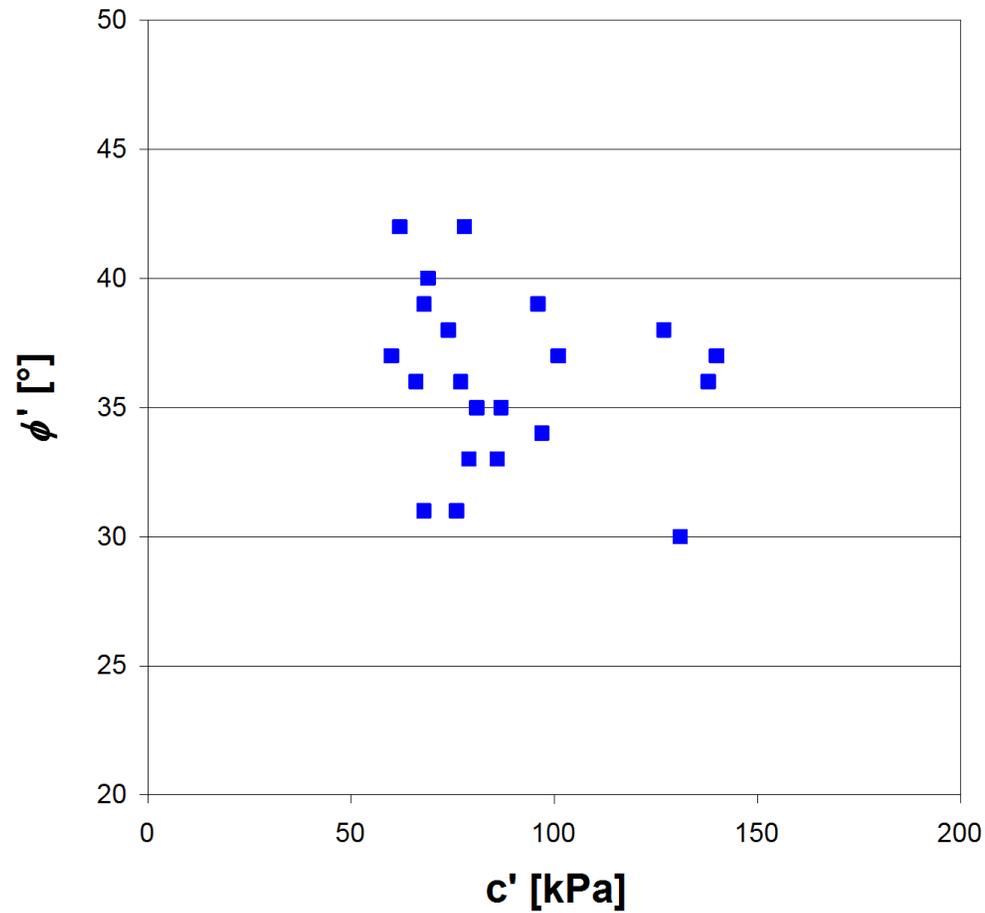


$\sigma'_3 = 100 \text{ kPa}$

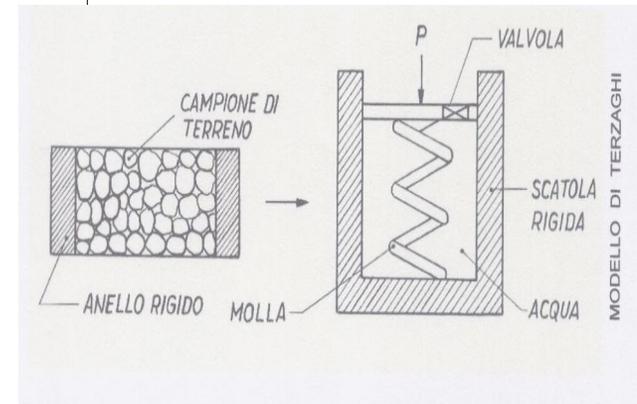
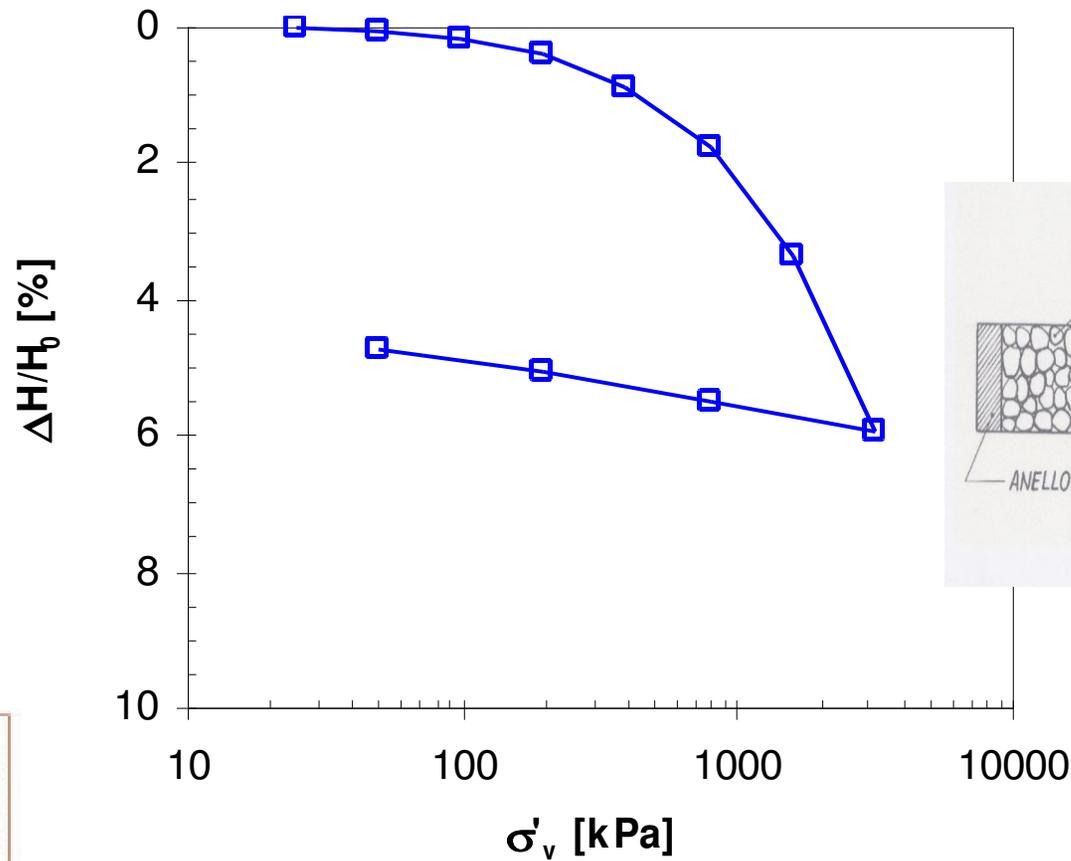
# Resistenza al taglio



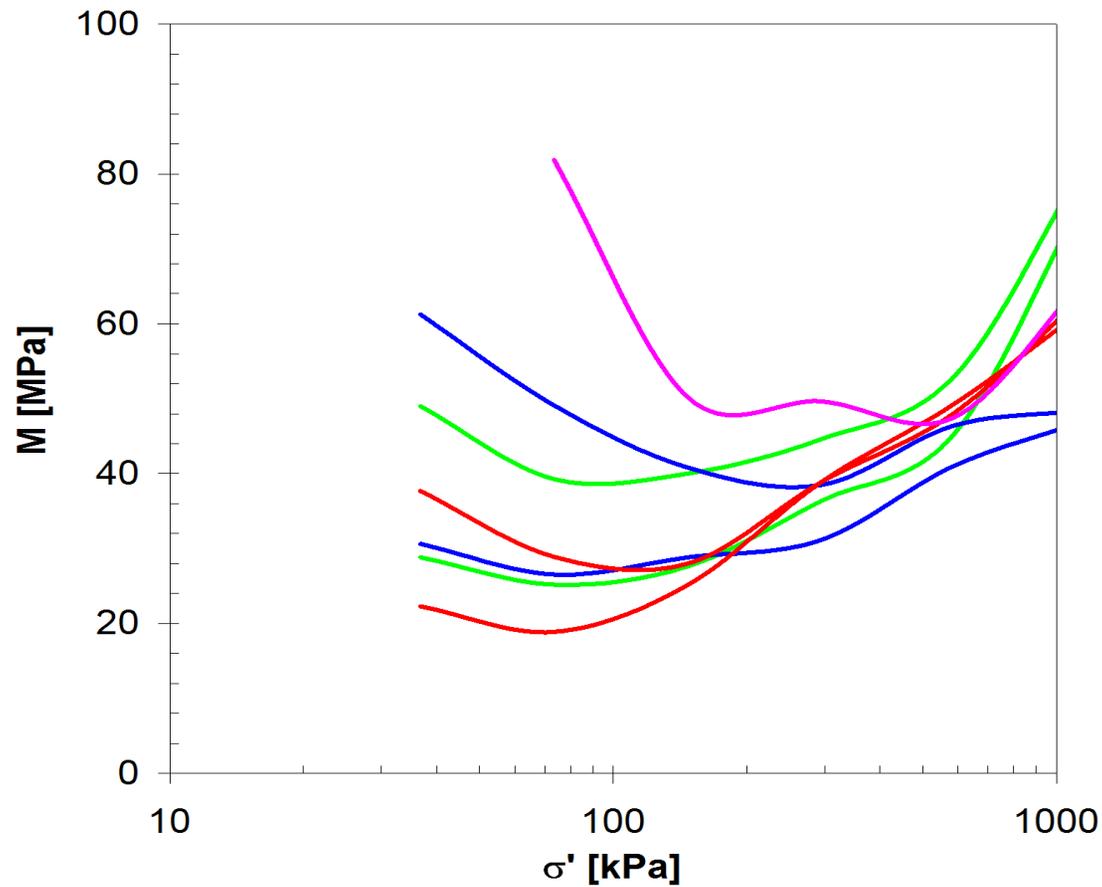
# Resistenza al taglio



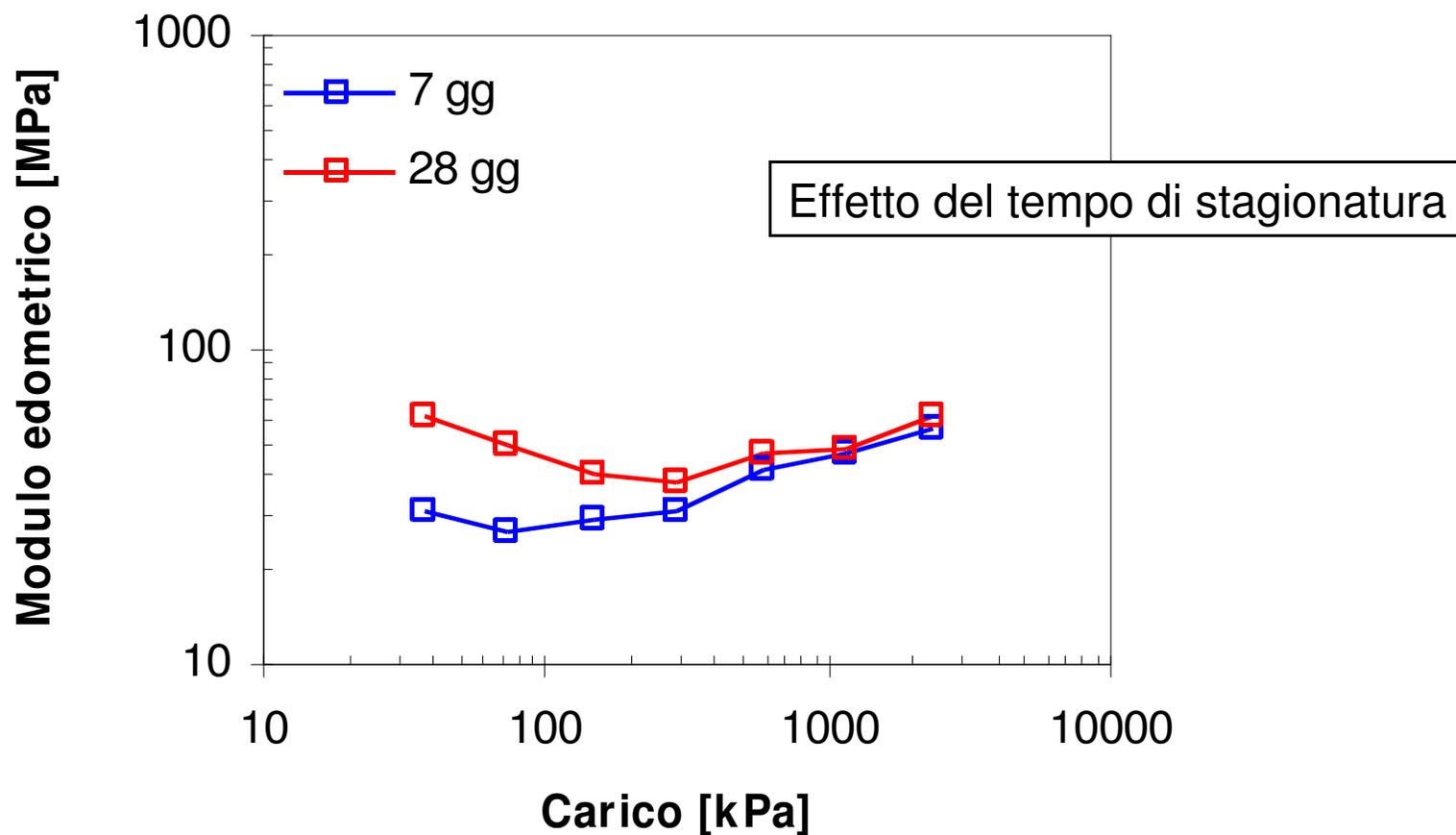
# Edometrica



# Modulo edometrico



# Modulo edometrico



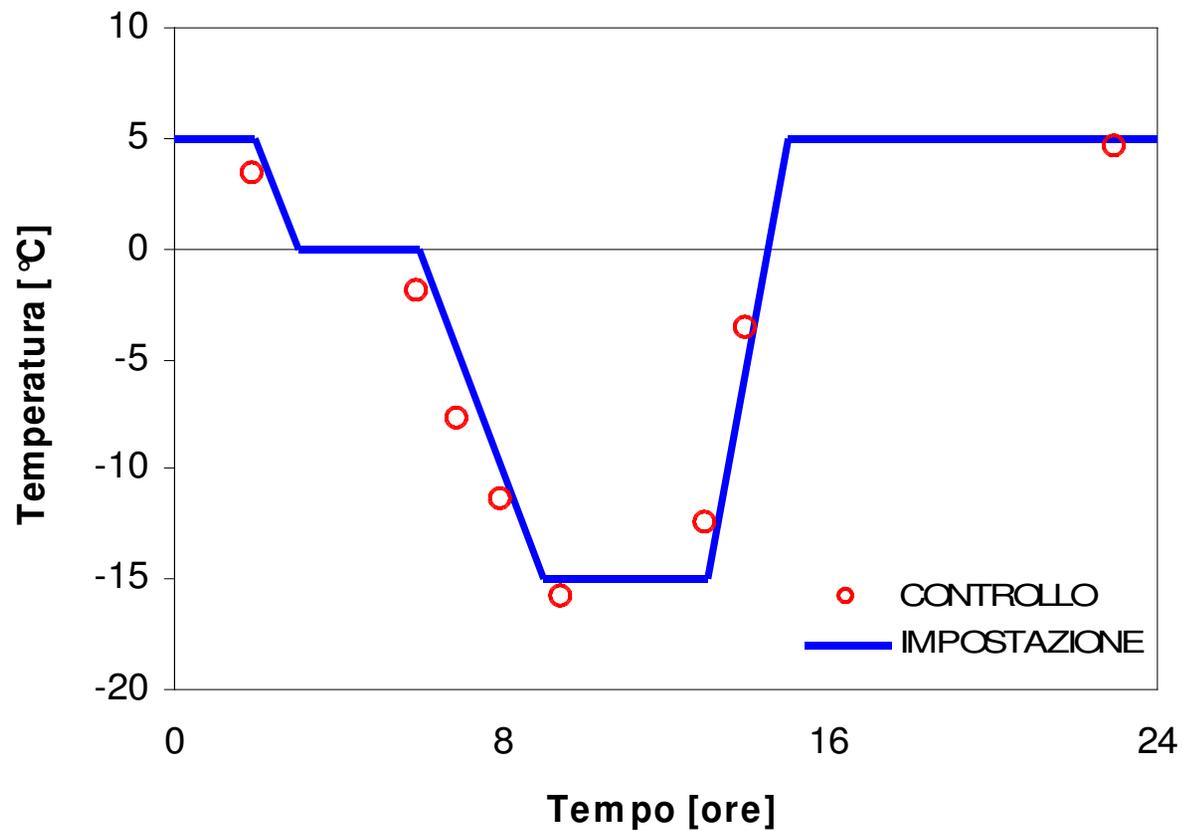
# Durabilità



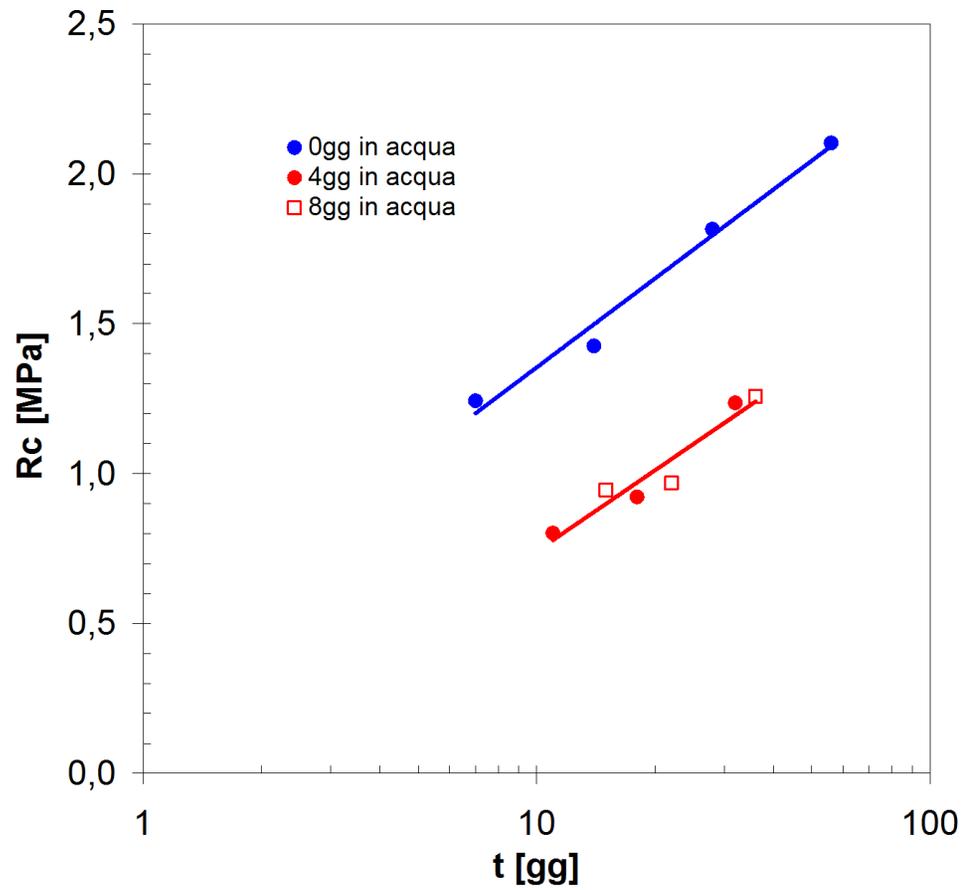
# Durabilità



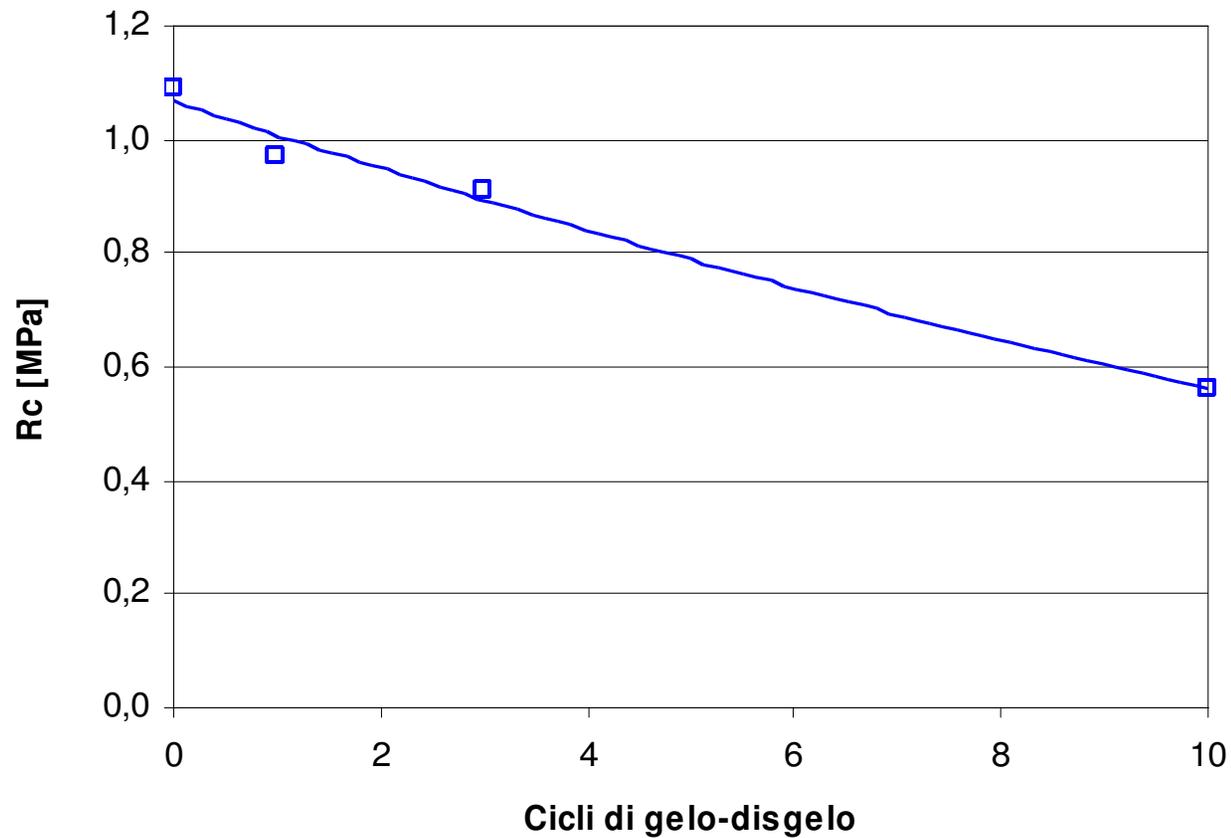
# Durabilità



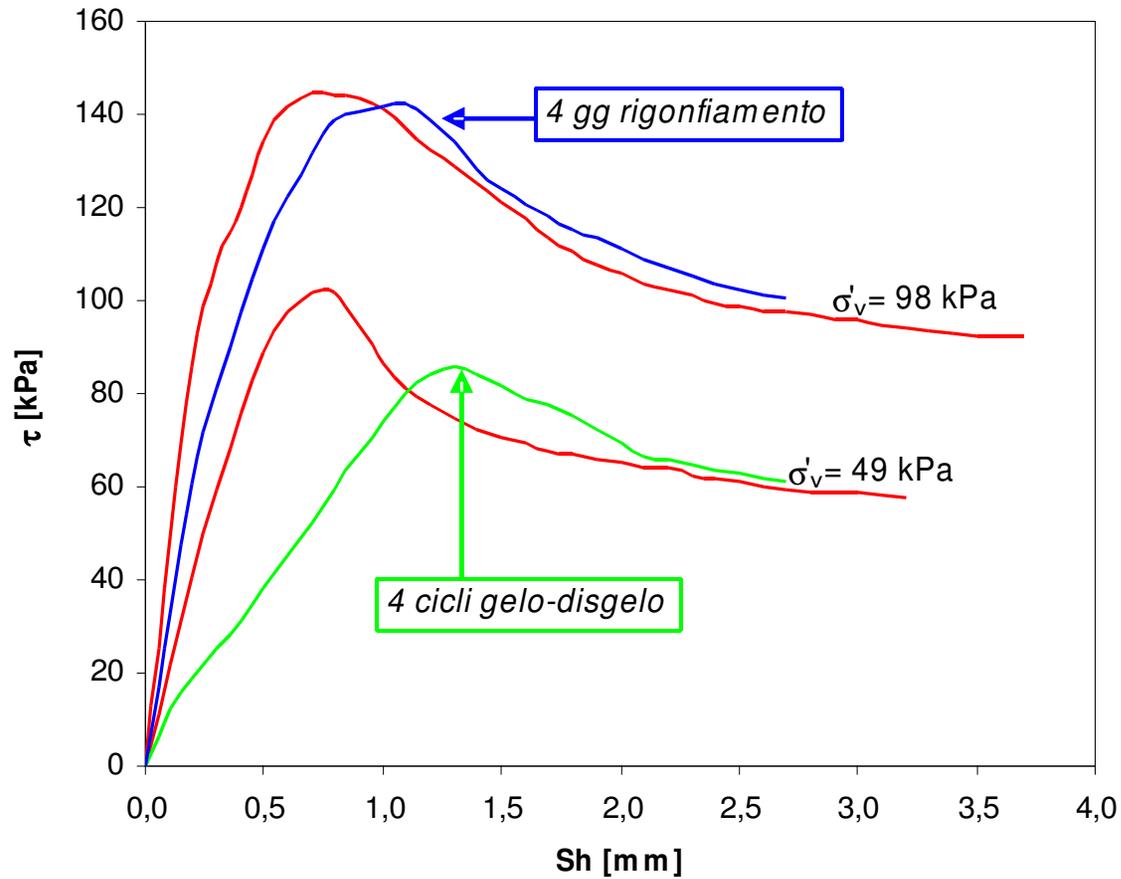
# Durabilità



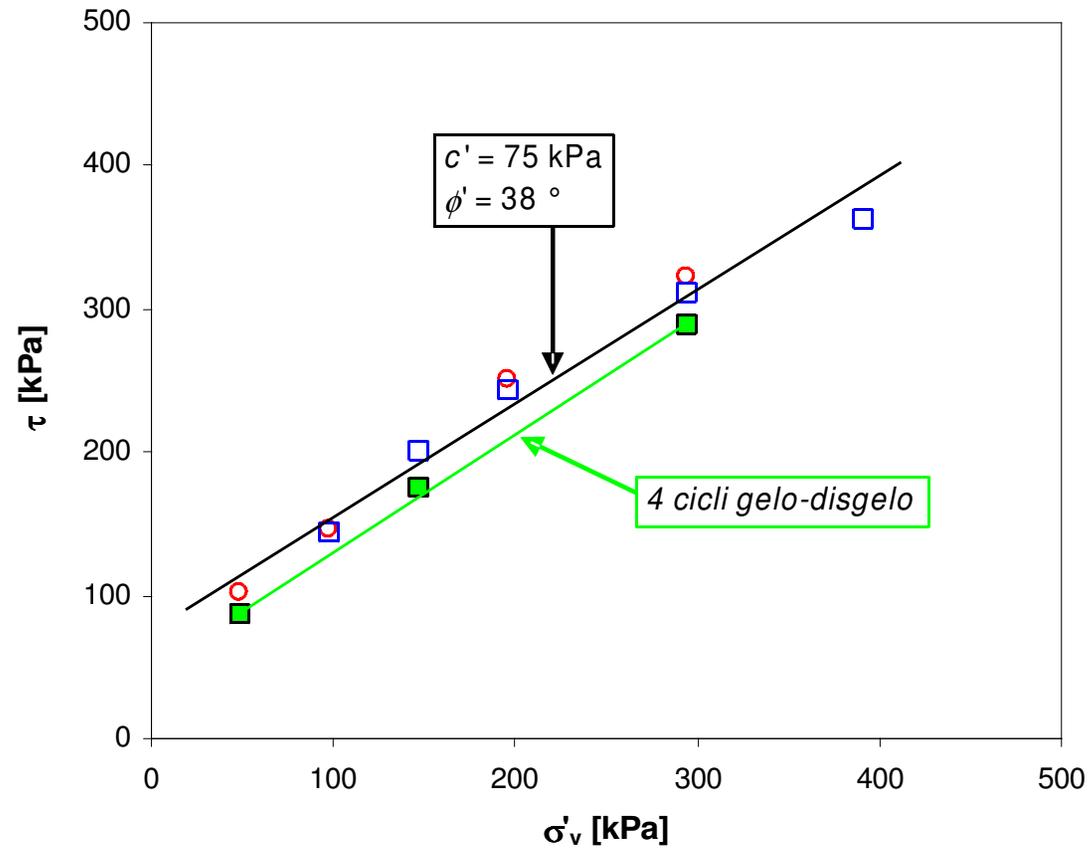
# Durabilità



# Durabilità



# Durabilità





# CONTROLLI IN SITO



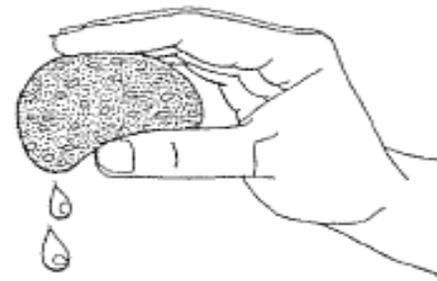
# Controllo umidità



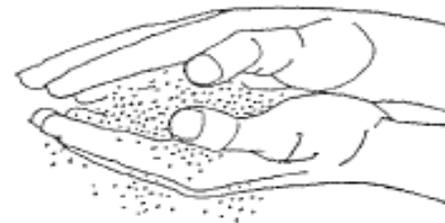
The sample is rolled into a ball between the palms of the hands.



The sample has close to optimum moisture content.

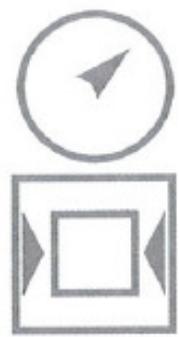


The moisture content is too high.

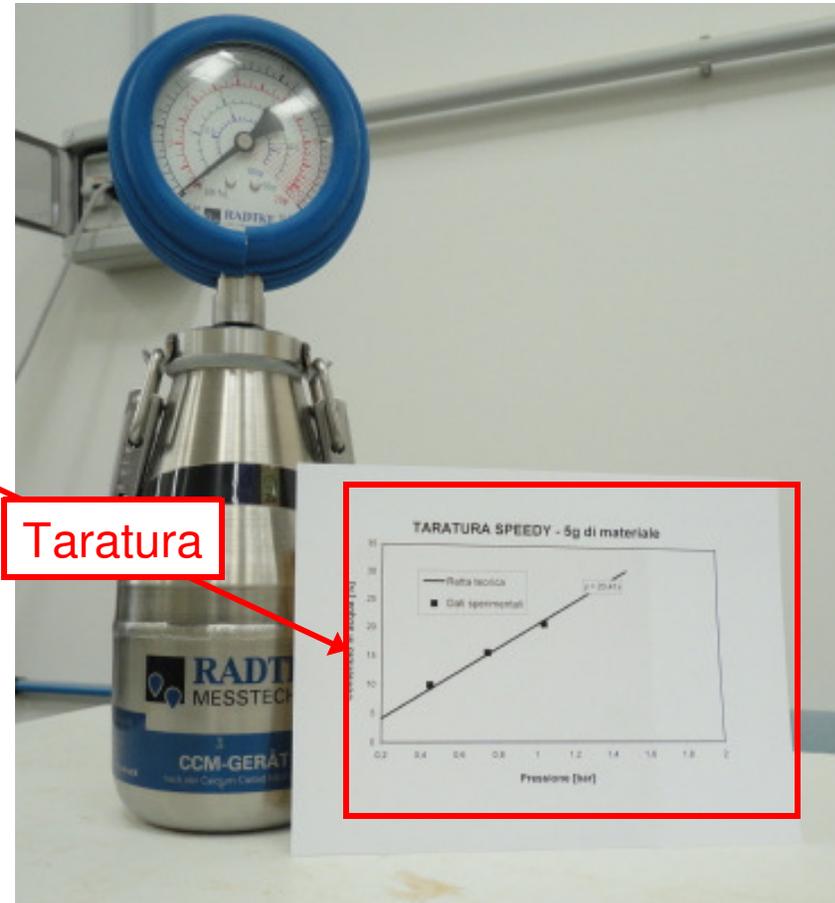


The moisture content is too low.

# Controllo umidità



Forno a micro-onde

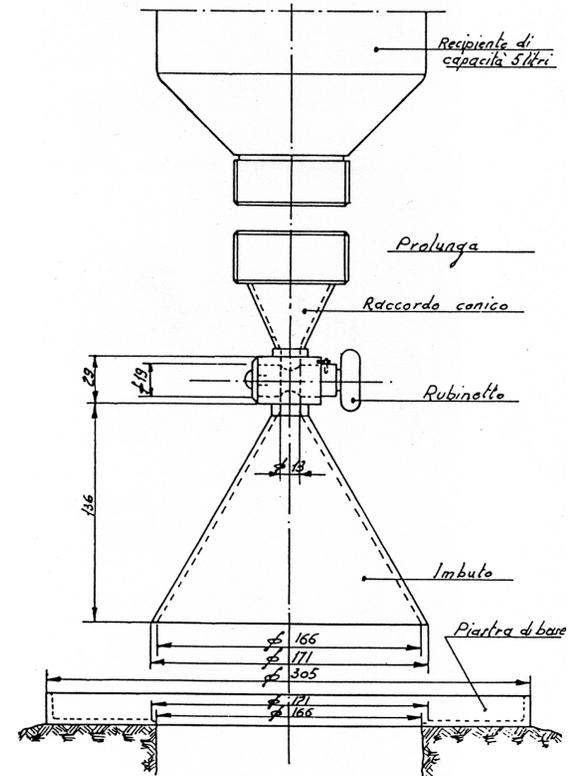
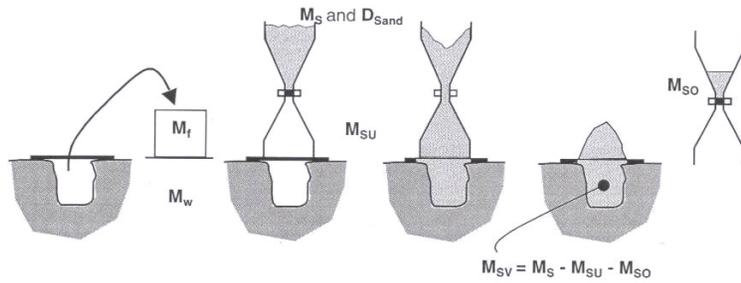


Speedy  
46

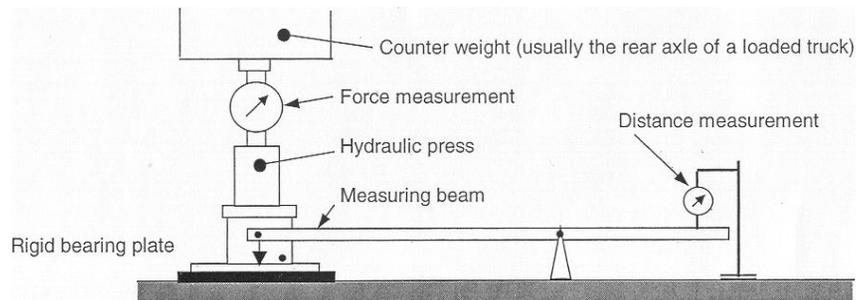
# Densità



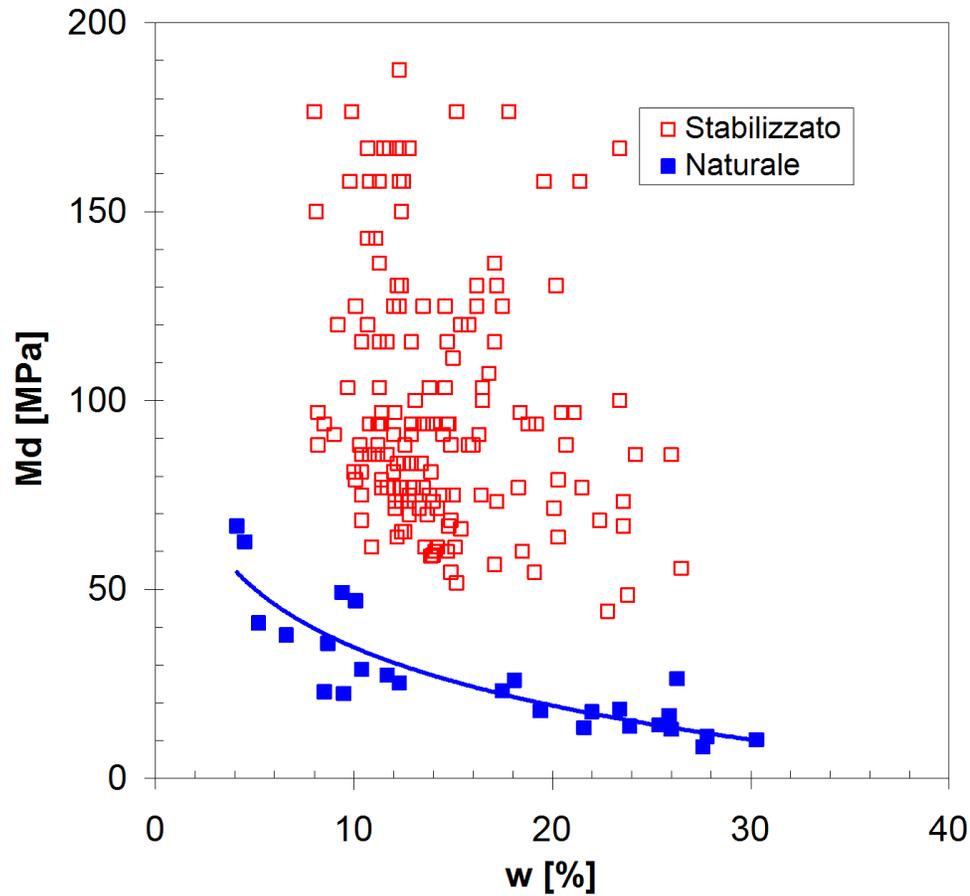
Laboratory facilities



# Prova di carico su piastra



# Prova di carico su piastra

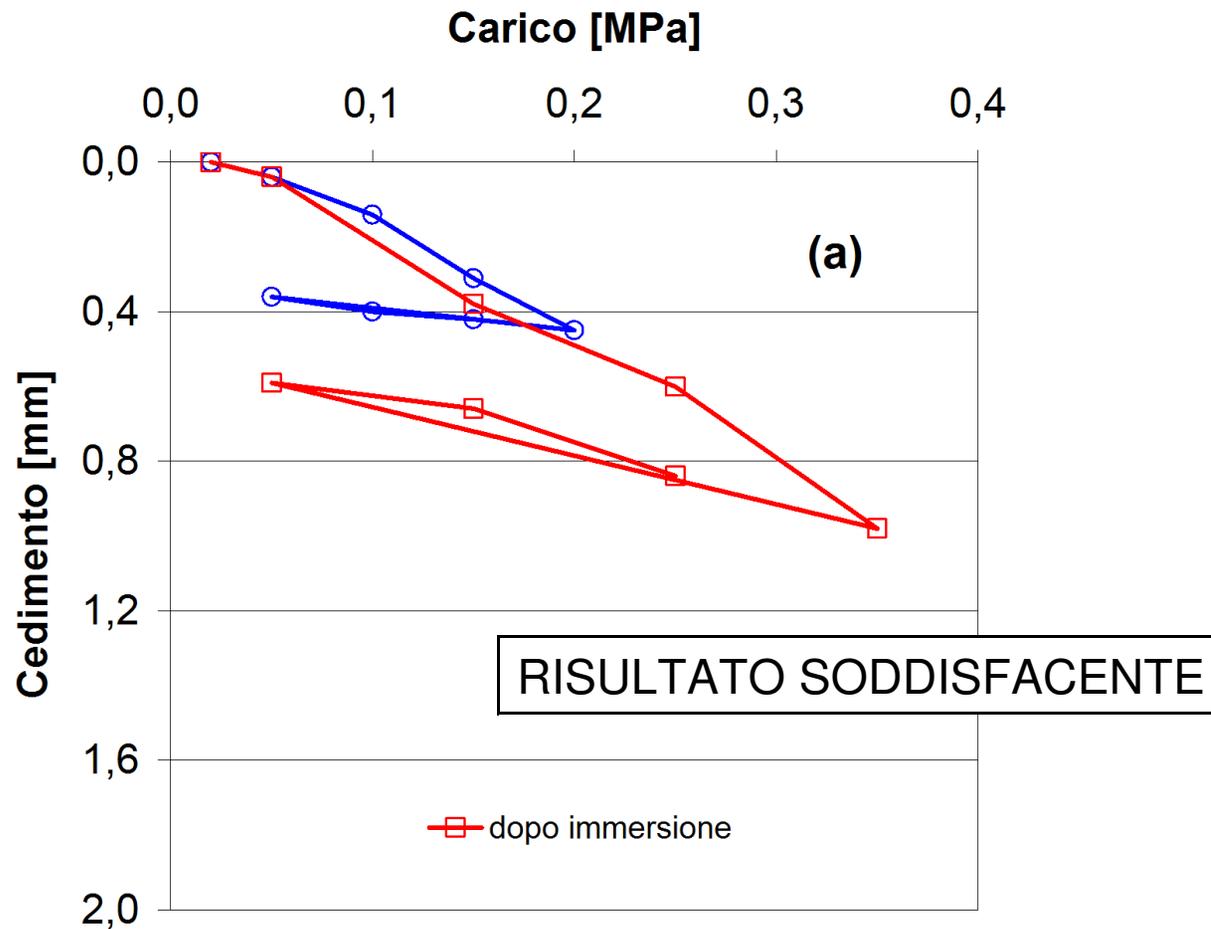


# Prova di carico su piastra

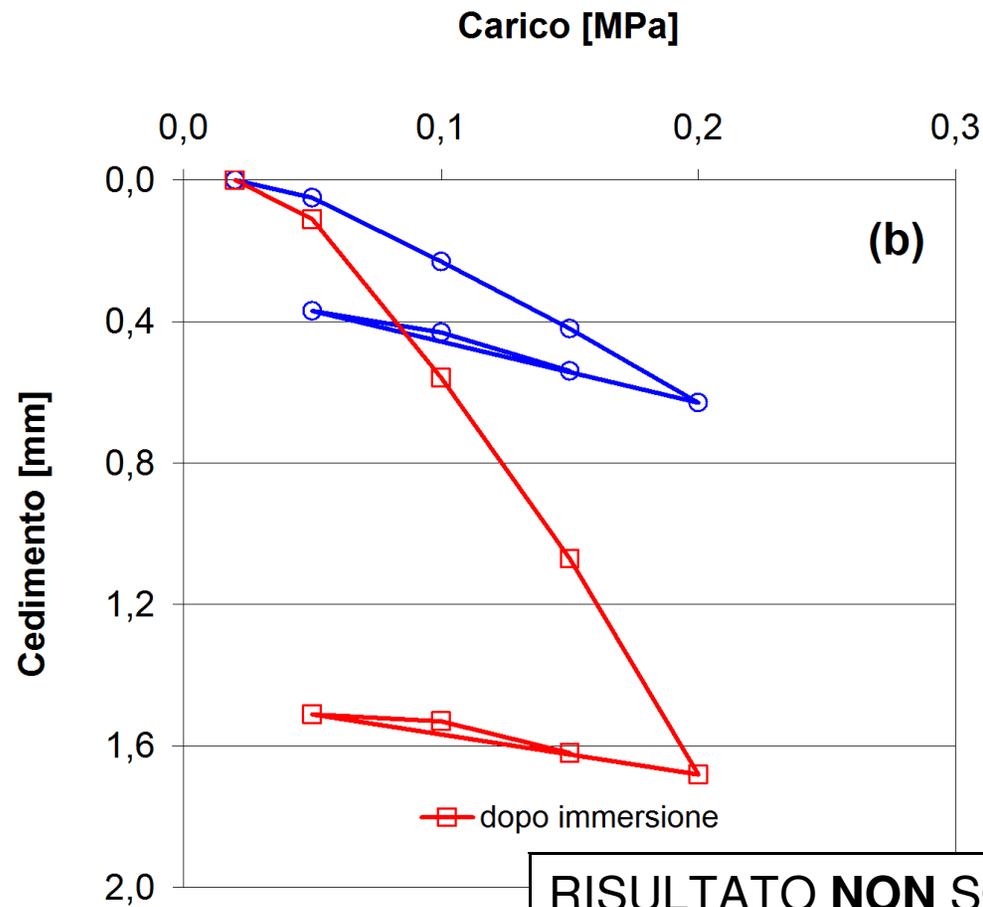


Scavo in fase di saturazione

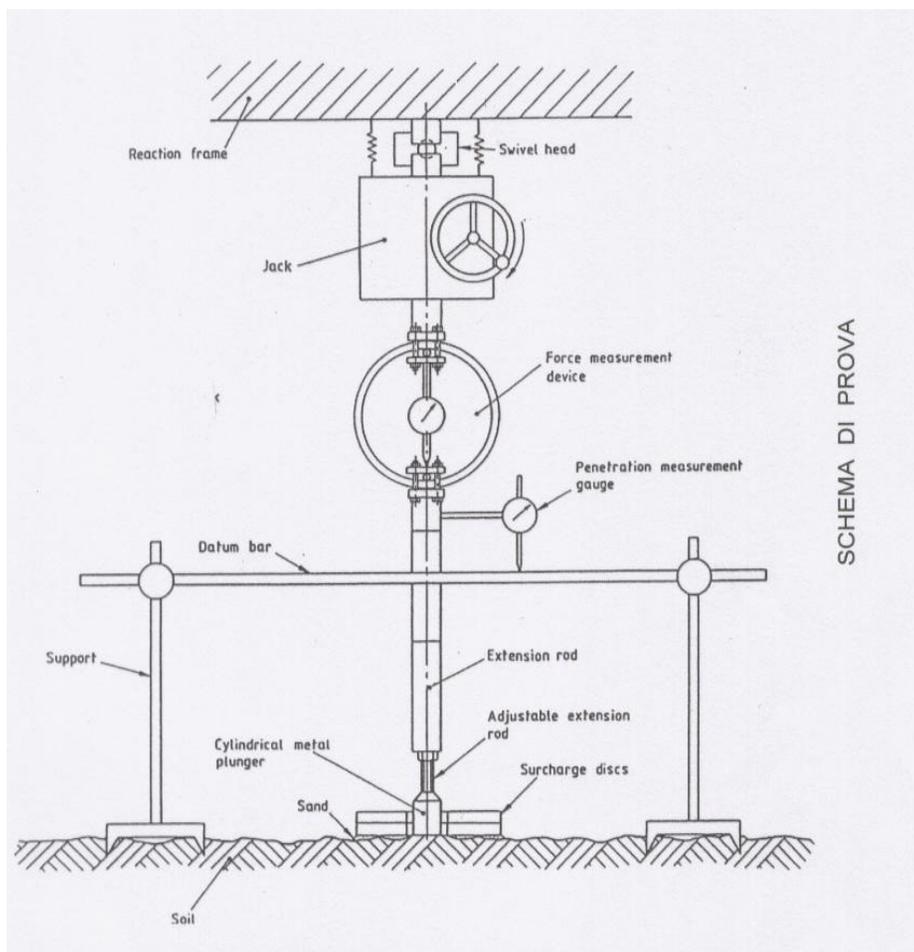
# Prova di carico su piastra



# Prova di carico su piastra



# Penetrazione CBR



## La stabilizzazione dei terreni con calce

Pesaro 29 aprile 2011

# La nuova specifica tecnica di RFI per il trattamento a calce dei terreni Applicazioni ferroviarie

Vittorio MISANO

Istituto Sperimentale

# La specifica tecnica di RFI

- Terra trattata con calce
- DEFINIZIONE
- Miscela composta da terra, calce viva o idrata ed acqua, in quantità e rapporti tali da modificare le caratteristiche fisico-meccaniche della terra, al fine di ottenere una miscela idonea per la formazione di strati di terreno che, dopo il costipamento, risultino di adeguata resistenza meccanica, nonchè stabili all'azione dell'acqua e del gelo

# La specifica tecnica di RFI

## Miglioramento della terra trattata con calce

### DEFINIZIONE

- Trattamento con contenuto di calce pari al CIC (consumo iniziale di calce) per il miglioramento immediato delle caratteristiche geotecniche della terra stessa, quali la riduzione del contenuto d'acqua, l'incremento della capacità portante, l'aumento dell'umidità ottima di costipamento e la riduzione dell'indice di plasticità. Il miglioramento delle caratteristiche fisiche della miscela non è garantito come durevole nel tempo

# La specifica tecnica di RFI

## Stabilizzazione della terra trattata con calce

### DEFINIZIONE

- Trattamento con contenuto di calce superiore al CIC (consumo iniziale di calce) tale da conferire alla terra oltre alle caratteristiche indicate nel miglioramento anche una stabilità ed irreversibilità alle azioni dell'acqua e del gelo e quindi una durabilità nel tempo.

# La specifica tecnica di RFI

## Miglioramento della terra

### a breve termine si ottiene :

- Riduzione del contenuto d'acqua
- Incremento della capacità portante
- Riduzione della plasticità

## Stabilizzazione delle terre

### a medio e lungo termine si ottiene :

- Modifica delle caratteristiche fisico-meccaniche
- Riduzione della sensibilità all'acqua ed al gelo

# La specifica tecnica di RFI

## Caratteristiche delle terre

Il trattamento dei terreni con calce è possibile per tutti i terreni argillosi, più o meno limosi, non dotati all'origine delle caratteristiche meccaniche e prestazionali richieste per la realizzazione di opere in terra.

### Limite di accettabilità:

- Granulometria contenuta nel fuso (CNR B.U. n.36)
- Indice di plasticità: > 10%
- Contenuto di sostanze organiche < 2%
- Contenuto di solfati e solfuri < 0,25 %

# La specifica tecnica di RFI

## Caratteristiche della calce

I tipi di calce impiegabili nella stabilizzazione dei terreni sono le calce da costruzione :

- CL 90
- CL 80

I requisiti fisici, granulometrici e chimici sono indicati nella norma UNI EN 459-1

# La specifica tecnica di RFI

## Caratteristiche chimiche della calce (es. Calce viva CL 90)

- CO<sub>2</sub> <4%
- CaO +MgO >90 %
- MgO < 5%
- SO<sub>3</sub> <2%
- Reattività all'acqua > 60° entro 25'

# La specifica tecnica di RFI

## Progetto del trattamento delle terre con calce

Il progetto della stabilizzazione a calce di una terra viene sviluppato secondo le seguenti tre fasi:

- Definizione dei volumi e delle caratteristiche del terreno da trattare e le % di calce da utilizzare per il trattamento
- Determinazione dei parametri di riferimento del terreno e scelta delle miscele
- Realizzazione del campo prova

# La specifica tecnica di RFI

## Identificazione della terra da trattare

- Composizione granulometrica
- Indici di plasticità
- Contenuto d'acqua naturale
- Contenuto in solfati e solfuri
- Contenuto in sostanze organiche
- Caratteristiche di costipamento
- Indice CBR
- Indice CBR immediato (IPI)

# La specifica tecnica di RFI

## Studio delle miscele sperimentali

Scopo dello studio delle miscele sperimentali è quello di determinare il quantitativo minimo di calce necessario ad ottenere il miglioramento prefissato delle caratteristiche del terreno tale da assicurare nel tempo i requisiti richiesti.

Nel caso della stabilizzazione vengono eseguite 3 miscele preparate aumentando dello 0,5 % ciascuna il contenuto di calce partendo dal valore del CIC (% di calce minima in grado di elevare il Ph della miscela al valore di 12,4).

Il valore % della calce da impiegare non dovrà mai essere inferiore al 2% del peso del secco del terreno.

# La specifica tecnica di RFI

## Studio delle miscele sperimentali

- Composizione granulometrica
- Indici di plasticità
- Contenuto d'acqua
- Caratteristiche di costipamento
- Indice CBR imbibito
- Indice CBR immediato (IPI)

## Limiti di accettazione delle miscele terra calce

CBR a 7 gg (3+4 imb.) >20 per strati piano di posa

> 50 per strati corpo rilevato

< 1 % rigonfiamento lineare

Indice portanza immediato > 10 (IPI)

# La specifica tecnica di RFI

## Studio delle miscele sperimentali

Prove di laboratorio su miscele terra /calce

- CBR dopo 28 gg di maturazione con imbibizione ultimi 4 gg
- Costipamento proctor modificato determinazione di  $W_{opt}$  e  $\gamma$
- Compressione semplice a 7 gg di maturazione  $d/h = 1/2$  su provini con diverso grado di  $W\%$  :  $W_{opt}$  -  $W_{opt+2\%}$  -  $W_{opt-2\%}$
- Compressione semplice a 28 gg di maturazione  $d/h = 1/2$  su provini con diverso grado di  $W\%$  :  $W_{opt}$  -  $W_{opt+2\%}$  -  $W_{opt-2\%}$

# La specifica tecnica di RFI

## Realizzazione del campo prova

Il campo prova ha lo scopo di verificare su scala reale quanto desunto dallo studio della miscela scelta e di definire metodo e modalità di compattazione

Si esegue il campo prova per volumi di terre da trattare > di 30.000 mc o piani di posa > di 15.000 mq.

I mezzi utilizzati dovranno essere i medesimi di quelli destinati alla realizzazione dell'opera.

Il pulvimixer dovrà avere una capacità di trattare spessori di 50 cm

Sugli strati finiti devono essere eseguiti i seguenti controlli :

- Md con piastra da 30 cm ai tempi: T=0 – T= 24 h – T= 7 gg – T= 28 gg solo sull'ultimo strato
- Densità in sito e W% al tempo T=0

# La specifica tecnica di RFI

## Controlli in corso d'opera

| CONTROLLI IN CORSO D'OPERA  |                      |   |
|---|----------------------|---|
| Tipo di controllo   | Frequenza            | Requisito   |
| Controlli sui materiali   |                      |   |
| Requisiti della calce   | ogni 1000 tonnellate |   |
| Verifica delle caratteristiche del terreno in cumulo, per realizzazione del corpo del rilevato    | Ogni 4.000 mc        |   |
| Misura del contenuto d'acqua della terra prima dell'aggiunta di calce                             | Giornaliera          |   |
| Verifica della quantità di calce in fase di stesa   | Giornaliera          | quantità (%) scelta dopo sperimentazione sul campo prova                      |
| <b>Controllo omogeneità granulometrica dei terreni dopo l'aggiunta di calce e la miscelazione</b> | <b>Ogni 1.000 mq</b> | <b>100 % pass al setaccio da 31,5 mm<br/>70 % passante al setaccio 5,6 mm</b> |
| <b>Verifica del contenuto d'acqua della miscela prima della compattazione</b>                     | <b>Giornaliera</b>   | <b>compreso tra +2 ÷ -2% Wopt</b>   |

# La specifica tecnica di RFI

## Controlli Finali

**Ogni 2000 mq dovrà essere verificato che:**

- **Il modulo di deformazione misurato con piastra da 30 cm sia  $> 20$  Mpa per il piano di posa del rilevato (intervallo dicarico (0,02-0,15 MPa) e**
- **$>40$  Mpa per il corpo del rilevato (intervallo di carico 0,15-0,25 MPa)**
- **Il grado di costipamento  $>95$  % della densità AASHTO modificato**
- **Lo spessore dello strato sia di 30 cm**

# Bologna – Milano

---

Il trattamento a calce  
dei terreni della linea  
AV Bologna - Milano

# Bologna – Milano

## Caratteristiche dei terreni

|                                     |       |
|-------------------------------------|-------|
| • Limite liquido                    | 44    |
| • Indice plastico                   | 23.5  |
| • USCS                              | CL    |
| • CIC (contenuto iniziale calce)    | 2     |
| • $W_{opt}$ %                       | 17.3  |
| □ $\gamma_{d,max}$                  | 16.64 |
| • IBI (indice di portanza iniziale) | 10    |
| • CBR                               | 3     |
| • Rigonfiamento %                   | 2,3   |

# Miscele preparate

---

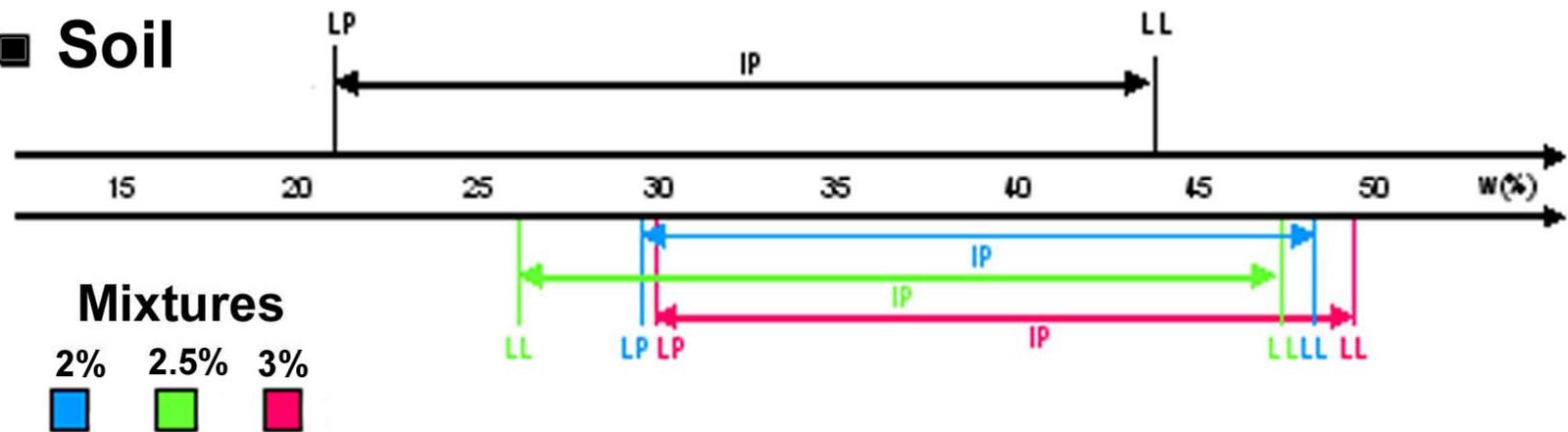
Miscela "A" = terreno + calce 2 % (CIC)

Miscela "B" = terreno + calce 2,5 % (CIC+ 0,5)

Miscela "C" = terreno + calce 3 % (CIC+ 1)

In accordo con la Specifica tecnica di RFI, le tre miscele avevano IPI>10 ed un rigonfiamento <1%

## Soil



Variation of Atterberg limits and plasticity index due to lime treatment

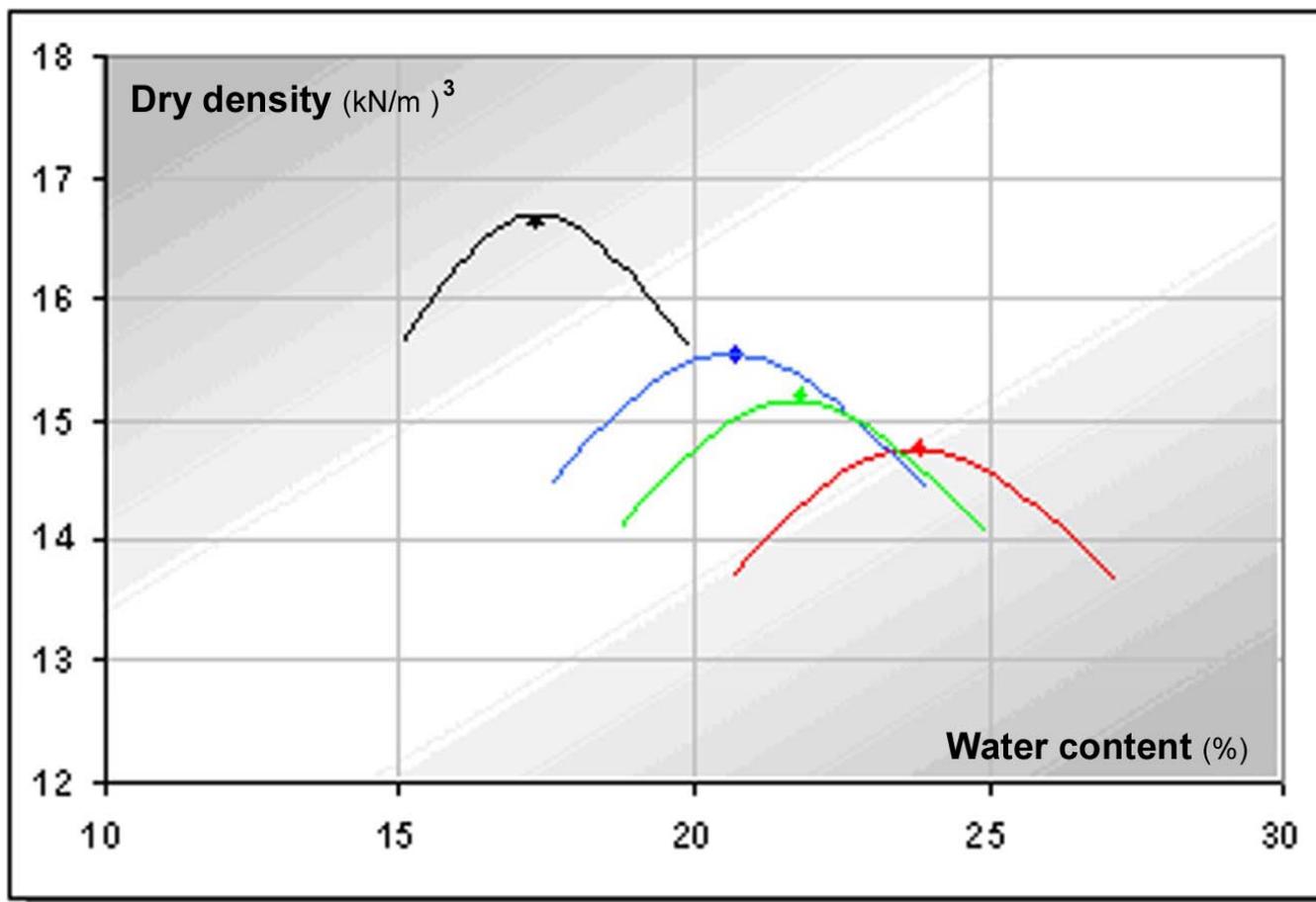
# Limiti di Atterberg

|    | Miscele con calce |      |      |      |
|----|-------------------|------|------|------|
|    | 0                 | 2    | 2,5  | 3    |
| LL | 44                | 48,1 | 47,3 | 49,4 |
| LP | 21                | 29,9 | 26,1 | 30   |
| IP | 23                | 18,2 | 21,2 | 19,4 |

# Proctor Test

|                   | Calce %   |       |       |       |
|-------------------|-----------|-------|-------|-------|
|                   | 0         | 2     | 2,5   | 3     |
|                   | $W_{ott}$ | 17,3  | 20,7  | 21,8  |
| $\gamma_{d\ max}$ | 16,64     | 15,54 | 15,21 | 14,78 |

# Curve di compattazione del terreno tal quale e delle tre miscele



■ soil

■ 2,0%

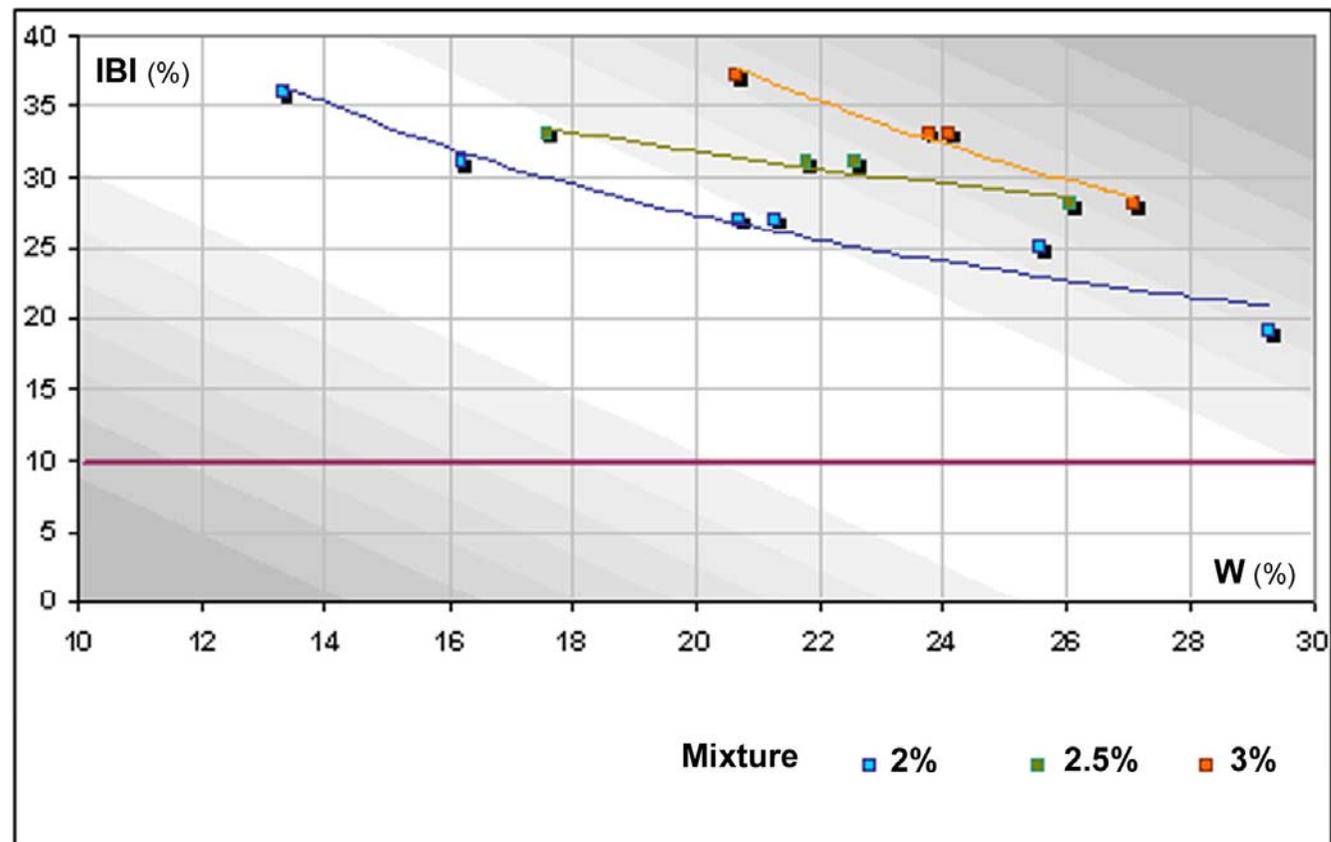
■ 2,5%

■ 3,0%

## Variazione del contenuto d'acqua e della densità al variare del dosaggio di calce

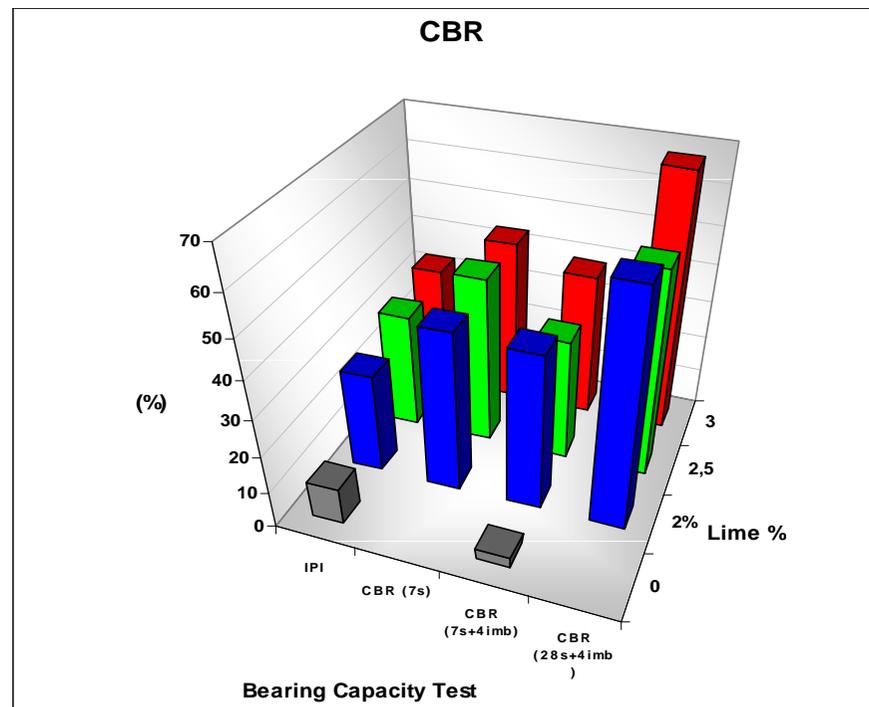
|                |       |       |       |       |
|----------------|-------|-------|-------|-------|
| Calce %        | 0     | 2     | 2,5   | 3     |
| $W_{opt}$ %    | 17.3  | 20.7  | 21.8  | 23.8  |
| $\gamma_d$ max | 16.64 | 15.54 | 15.21 | 14.78 |

## Trend dell'indice di portanza iniziale al variare del contenuto d'acqua per le tre miscele



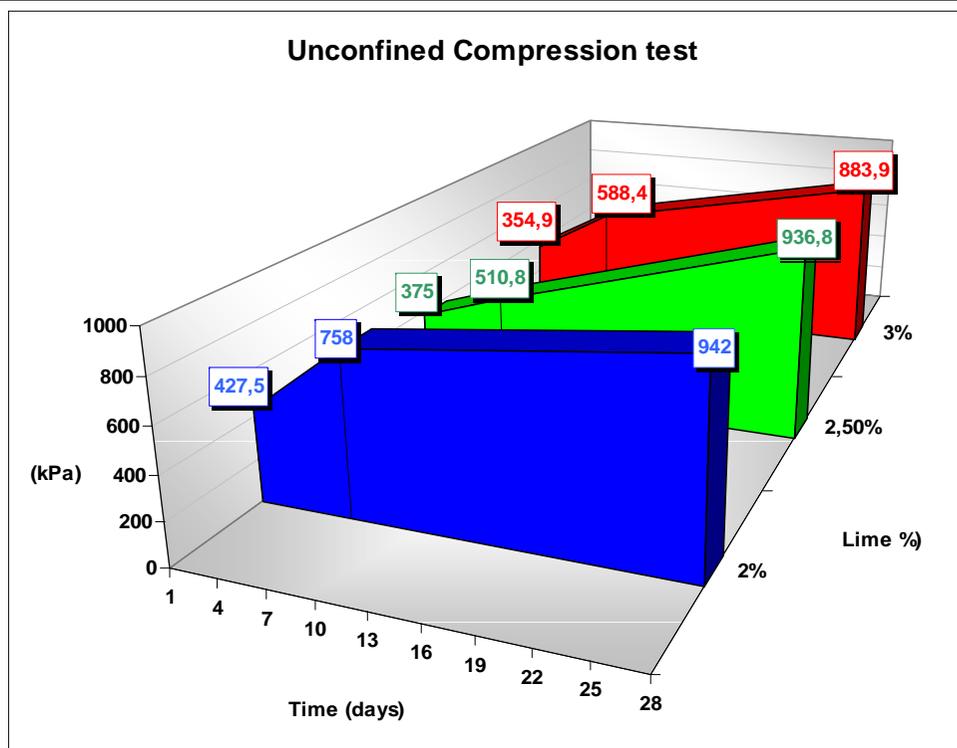
## CBR in varie condizioni di maturazione ed imbibizione

| Tempo (giorni)                     | % calce |    |     |    |
|------------------------------------|---------|----|-----|----|
|                                    | 0       | 2  | 2,5 | 3  |
| 0                                  | 10      | 27 | 31  | 33 |
| 7                                  |         | 43 | 45  | 44 |
| 11 (7 maturazione.+4 imbibizione.) | 3       | 42 | 33  | 39 |
| 32 (28 maturazione +4 imbibizione) |         | 62 | 55  | 68 |



## Evoluzione nel tempo della resistenza a compressione semplice per le tre miscele trattate a calce

| Tempo (giorni) | Dosaggio di calce |       |       |
|----------------|-------------------|-------|-------|
|                | 2%                | 2,50% | 3%    |
| 1              | 427,5             | 375   | 354,9 |
| 7              | 758               | 510,8 | 588,4 |
| 28             | 942               | 936,8 | 883,9 |



---

# Conclusioni

- I risultati delle prove in sito hanno dato esito migliore di quelli evidenziati nello studio preliminare di laboratorio;
- Sono stati trattati oltre 6.000.000 di metri cubi di terreno utilizzando 300.000 tonnellate di calce ;
- La necessita di trattare il terreno con calce in grande scala è stata una innovazione tecnologica per le ferrovie italiane;

---

# Conclusioni

- Dal punto di vista ambientale, il trattamento dei terreni con calce ha permesso di ridurre al minimo il consumo di materiali naturali pregiati attraverso il riutilizzo di terreni che altrimenti sarebbero andati in discarica perché dotati di scadenti caratteristiche meccaniche;
- Per un efficace trattamento è necessario eseguire un attento controllo delle caratteristiche dei materiali prima e dopo la stabilizzazione; lo studio preliminare di laboratorio ed i campi prova delle miscele hanno garantito le caratteristiche richieste.
- La specifica tecnica di RFI adottata per il trattamento dei terreni con calce, ha costituito una guida fondamentale per la Direzione lavori e per la stazione appaltante;



Miscelazione in sito terreno-calce



## Compattazione dei terreni dopo miscelazione



Veduta aerea della linea AC Bologna-Milano in costruzione



**Grazie per l'attenzione**



# **GESTIONE E PRATICA DEI CANTIERI:**

## **SCHEMI DI LAVORAZIONE, ATTREZZATURE, LOGISTICA, COSTI E PRODUZIONE**

# FASI DI LAVORAZIONE

---

La tecnica di stabilizzazione delle terre si realizza attraverso 5 fasi, ognuna delle quali riveste fondamentale importanza per la buona riuscita del processo:

## 1. PREPARAZIONE DEL TERRENO

1. CONTROLLO DELL'UMIDITA' NATURALE

## 2. STESA DELLA CALCE

## 3. MISCELAZIONE

3. CONTROLLO E CORREZIONE DELL'UMIDITA'

## 4. COMPATTAZIONE

## 5. PROTEZIONE

# ATTREZZATURE

---

Oltre alle classiche attrezzature per il movimento terra, sono necessarie le seguenti macchine operatrici specifiche:

1. LO SPANDICALCE
2. IL PULVIMIXER
3. IL RULLO A PIEDE DI MONTONE
4. IL GRAEDER
5. IL RULLO LISCIO FERRO-GOMMA
6. IL RULLO GOMMATO

---

# 1. PREPARAZIONE DEL TERRENO

# FASE 1: PREPARAZIONE DEL TERRENO

- ✘ Consiste nell'asportazione della parte vegetale e degli eventuali trovanti presenti nello spessore di terreno da trattare. L'entità della asportazione si valuta di volta in volta in funzione della presenza di **sostanza organica decomposta**.
- ✘ Contestualmente si predispone la superficie piana in coerenza con il progetto altimetrico dell'opera.
- ✘ Sul terreno preparato si procederà alla misura dell'umidità per capire se durante la successiva lavorazione si dovrà aggiungere o togliere acqua.
- ✘ **IMPORTANTE:** La sostanza organica decomposta sottrae calce alla reazione con l'argilla, depotenziandone fortemente l'azione stabilizzante.



---

## 2. STESA DELLA CALCE

## FASE 2: STESA DELLA CALCE

- ✘ Si esegue con idonee attrezzature a dosaggio volumetrico o gravimetrico a seconda della tecnologia disponibile.
- ✘ La quantità (q) di calce in kg da stendere per ogni m<sup>2</sup> di superficie si calcola nel seguente modo:

$$q = \gamma \times (c/100) \times s$$

dove:  $\gamma$  = densità max secca della terra da trattare in kg/m<sup>3</sup>;

c = la quantità di calce (in %) stabilita dallo studio di mix-design;

s = spessore dello strato finito in m;



## FASE 2: LA STESA DELLA CALCE

- ✘ Il controllo della quantità di calce stesa si esegue quotidianamente pesando il quantitativo raccolto su di una superficie nota, al passaggio dello spandicalce.
- ✘ E' ammessa una tolleranza del 10% circa che corrisponde al grado di precisione delle macchine spandicalce.



**AVVERTENZA:** non si deve commettere l'errore di diminuire il quantitativo di calce in presenza di terre asciutte: il dosaggio è stabilito in fase di progetto delle miscele in funzione della reattività con l'argilla.

Il sottodosaggio della calce compromette la durabilità dell'opera a lungo termine perché limita le reazioni pozzolaniche.

---

# 3. MISCELAZIONE

## FASE 3: MISCELAZIONE

- ✘ La miscelazione della terra con la calce avviene mediante il pulvimixer. La profondità di lavorazione varia da 30cm a 50cm a seconda delle indicazioni del progetto.
- ✘ La velocità di avanzamento del pulvimixer dipende dal tipo di terreno, dal grado di addensamento, dall'umidità e dalla potenza della macchina, e incide in modo determinante sulla produttività.
- ✘ La larghezza di lavorazione varia a seconda del tipo di macchina da 2m a 2,5m.



## FASE 3: MISCELAZIONE

- ✘ Dopo la miscelazione della terra con la calce si devono controllare la granulometria, la omogeneità e la profondità dello strato miscelato.
- ✘ La miscela si ritiene idonea quando appare di colore omogeneo e la componente limo - argillosa è interamente passante al setaccio da 25 mm.
- ✘ Mediamente, per raggiungere un grado di miscelazione soddisfacente il pulvimixer deve effettuare da 2 a 3 passaggi.



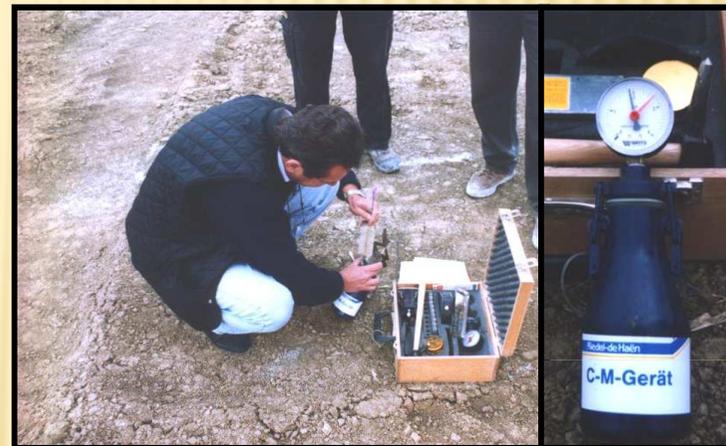
## FASE 3: MISCELAZIONE

- × **IMPORTANTE 1:** una miscelazione insufficiente lascia nello strato zolle di materiale limo-argilloso “non modificato” che causano problemi di rigonfiamento e ritiro a contatto con l’acqua;
- × **IMPORTANTE 2:** la non omogenea distribuzione della calce crea “zone deboli” nello strato che causeranno problemi alla pavimentazione stradale.



## FASE 3B: CONTROLLO E CORREZIONE DELL'UMIDITA'

- ✘ Il contenuto d'acqua della miscela, al momento della compattazione, deve essere vicino al contenuto ottimo Proctor.
- ✘ Quando si è nella necessità di aggiungere acqua, l'operazione deve essere sempre seguita da un passaggio di pulvimixer per omogeneizzare la distribuzione dell'acqua nello strato.
- ✘ **IMPORTANTE:** lavorare in eccesso d'acqua impedisce il conseguimento della densità di progetto; al contrario in una miscela troppo asciutta non si sviluppano le reazioni pozzolaniche di indurimento.



---

# 4. COMPATTAZIONE

## FASE 4: COMPATTAZIONE

- ✘ L'operazione di compattazione inizia quando la calce viva si è completamente spenta e si sono conclusi i cosiddetti “effetti di breve termine”.
- ✘ Per garantire il completo spegnimento della calce si devono attendere circa 2h dalla fine della miscelazione all'inizio della compattazione.
- ✘ Il peso dei rulli deve essere adeguato allo spessore dello strato da compattare: è quasi sempre sconsigliato eccedere i 40cm di strato finito compattato.



## FASE 4: COMPATTAZIONE

- ✘ Il tipo ed il numero dei passaggi dei rulli si stabilisce con l'obiettivo di raggiungere la densità massima Proctor indicata dal laboratorio, lungo tutto lo spessore dello strato in lavorazione.
- ✘ Per la compattazione in profondità delle terre coesive si usano i rulli "a piede di montone".
- ✘ L'operazione si completa con un rullo liscio ferro-gomma e/o un rullo interamente gommato, che permettono di ottenere la chiusura in superficie.



## FASE 4: COMPATTAZIONE

- × **IMPORTANTE 1:** una compattazione insufficiente, o con rulli non adeguati compromette pesantemente tutto il lavoro svolto in precedenza.
- × **IMPORTANTE 2:** anche un eccesso di compattazione, se eseguito su di uno strato esile appoggiato su di un terreno naturale soffice può danneggiare lo strato appena realizzato.
- × **IMPORTANTE 3:** è sempre sconsigliato riprendere la compattazione su di uno strato eseguito nei giorni precedenti, perché si andrebbero a demolire i legami formati nel frattempo.



---

# 5. PROTEZIONE

## FASE 5: PROTEZIONE

- ✘ Le terre stabilizzate con la calce non costituiscono mai uno strato di finitura.
- ✘ Nelle ore successive alla compattazione si deve provvedere alla posa di uno strato di protezione che consenta il mantenimento del giusto grado di umidità.
- ✘ Durante la realizzazione dei rilevati, la protezione si ottiene con la posa dello strato di rilevato successivo.



## FASE 5: PROTEZIONE

- × Nel caso di realizzazione dell'ultimo strato della sottostruttura, la protezione si può ottenere posando, tutto o in parte, lo strato di fondazione in misto granulare.
- × **IMPORTANTE 1:** l'eccessivo essiccamento superficiale dello strato trattato provoca la formazione di crepe che permettono l'infiltrazione di acqua e il deterioramento progressivo dell'intero strato.
- × **IMPORTANTE 2:** il gelo costituisce un rischio serio; in questo caso la protezione si ottiene posando uno spessore di almeno 15 cm di materiale protettivo



---

# LA GESTIONE DEI PROBLEMI



Convegno ALIG 29 aprile 2011 - Angelo Canziani, Umberto Pressato

# LA GESTIONE DEI PROBLEMI

---

I problemi che si manifestano durante la lavorazione, se correttamente interpretati, si possono risolvere in corso d'opera.

In alcuni casi la comparsa dei problemi si manifesta anche dopo diverso tempo dalla messa in opera.

In ogni caso, anche in queste situazioni, nella maggioranza dei casi si è in grado di risalire alla causa e successivamente di porvi rimedio.

# ALCUNI DEI PROBLEMI PIU' FREQUENTI

---

## 1. LAVORAZIONE IN DIFETTO D'ACQUA:

è causa frequente di ammaloramento dello strato dopo l'apertura del traffico.

In mancanza del necessario quantitativo d'acqua, non solo non si ottengono le densità in fase di compattazione, ma soprattutto non si innescano le reazioni pozzolaniche di indurimento.

**Il materiale rimane sciolto e poco addensato: va da sé che sotto l'effetto dei carichi vi saranno dei cedimenti.**

# ALCUNI DEI PROBLEMI PIU' FREQUENTI

---

## 2. LAVORAZIONE ESEGUITA A TEMPERATURE TROPPO BASSE:

Il trattamento con calce eseguito a temperature inferiori ai 5 °C non apporta nessun beneficio.

A queste temperature la calce si comporta come un inerte, pertanto non si innescano ne i processi di scambio ionico ne le reazioni pozzolaniche.

Se lo strato trattato in queste condizioni, viene sollecitato prima che vi sia un significativo periodo di rialzo delle temperature, si deteriorerà molto rapidamente comportando la necessità di un completo rifacimento.

# ALCUNI DEI PROBLEMI PIU' FREQUENTI

---

## 3. MANCATA PROTEZIONE

Anche quando il trattamento fosse stato eseguito a regola d'arte, la mancata protezione dall'eccessivo essiccamento o dal gelo comporterà il progressivo deterioramento a partire dalla superficie superiore.

Quando il danno è localizzato in pochi cm della parte superiore, basterà provvedere all'asportazione di questi prima della posa del successivo strato.

Nel caso in cui l'esposizione sia stata prolungata, e si siano formate fessure profonde, può rendersi necessario il rifacimento completo dello strato, con l'apporto di nuovo legante e verifica dell'umidità.

# ALCUNI DEI PROBLEMI PIU' FREQUENTI

## 4. TIPO E/O QUANTITATIVO DI LEGANTE ERRATI

Il tipo ed il quantitativo di legante da utilizzare sono determinanti dal laboratorio per il conseguimento delle prestazioni di progetto.

Accade, che in presenza di terreni limo – sabbiosi con scarso contenuto di argilla, al mancato ottenimento dei risultati si cerca di porre rimedio addizionando dell'altra calce, ottenendo così risultati ancora peggiori.

Anche l'utilizzo di calce con alto contenuto di Magnesio ( $MgO > 7\%$ ) genera due tipi di problemi:

- il sottodosaggio di Ossido di Calcio ( $CaO$ );
- un potenziale pericolo di rigonfiamento per la tardiva idratazione del Ossido di Magnesio.

---

# LOGISTICA E PRODUZIONI



Convegno ALIG 29 aprile 2011 - Angelo Canziani, Umberto Pressato

# LOGISTICA E PRODUZIONI

- ✘ Un cantiere ben organizzato produce mediamente da **1000 a 1200 m<sup>3</sup>/giorno** di miscela stabilizzata in opera per ogni squadra di lavorazione.
- ✘ Per movimentare **1000 m<sup>3</sup>** di terra dalla zona di scavo alla zona di lavorazione ci vogliono circa **40 viaggi** con mezzi d'opera da **38 tonnellate**.
- ✘ Ipotizzando di operare con una miscela di calce al **3%**, sarà necessario ricevere in cantiere dalle **50 alle 60 tonnellate** di calce giornaliera.



# LOGISTICA E PRODUZIONI



- ✘ Per evitare che la mancata consegna della calce provochi la fermata di tutte le attività del cantiere, si deve predisporre un'adeguata capacità di stoccaggio che garantisca l'autosufficienza per almeno due giornate di lavoro.

# LOGISTICA E PRODUZIONI

- ✘ E' molto importante predisporre nelle vicinanze del luogo di lavoro un punto di approvvigionamento di acqua dolce: spesso nei periodi estivi la carenza d'acqua è causa di rallentamento della produzione.
- ✘ Si consideri che per alzare del 5% l'umidità di 1000 m<sup>3</sup> di terre possono servire fino a 90.000 litri d'acqua ogni giorno.



---

# COSTI DI LAVORAZIONE



Convegno ALIG 29 aprile 2011 - Angelo Canziani, Umberto Pressato

# COSTI DI LAVORAZIONE

Per la sistemazione in rilevato di **1000 m<sup>3</sup>/giorno** di terre provenienti dagli scavi in ambito di cantiere, in strati non superiori ai 40 cm mediante stabilizzazione a calce, escluso l'approvvigionamento e il trasporto delle terre, serve una squadra di lavoro così composta:

N.1 OPERAIO CAPOSQUADRA  
N.2 OPERAI QUALIFICATI  
N.1 PALA MECCANICA  
N.1 SPANDICALCE  
N.1 PULVIMIXER  
N.1 AUTOBOTTE PER L'ACQUA  
N.1 RULLO A PIEDE DI MONTONE  
N.1 RULLO LISCIO  
N.1 GRADER  
N.1 SILO DI STOCCAGGIO LEGANTE

**5,0 €/m<sup>3</sup> + spese  
generali e utili di  
impresa.**

# COSTI DI LAVORAZIONE

---

Ai costi precedentemente esposti bisogna aggiungere quelli del legante.  
Ipotizzando una percentuale di calce del 3% sul peso secco delle terre si ha:  $1000 \text{ m}^3 \times 1,7 \text{ t/m}^3 \times 3\% \times 80,0 \text{ €/t} = 4,10 \text{ €/m}^3$

IN TOTALE, CONSIDERANDO UNA PRODUZIONE MEDIA DI  $1000 \text{ m}^3/\text{giorno}$ ,  
ED UNA MISCELA AL 3% DI CALCE SI HANNO:

$9,10 \text{ €/m}^3 + \text{spese generali} + \text{utili di impresa}$



**GRAZIE PER  
L'ATTENZIONE**



Convegno ALIG 29 aprile 2011 - Angelo Canziani, Umberto Pressato