Stabilizzazione delle terre

Prof. Ing. Gabriele Tebaldi

Università di Parma – Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

University of Florida – E.S.S.I.E., Department of Civil & Coastal Engineering

Stabilizzazione a calce

University of Parma

Perche' Stabilizzare?

La costruzione di opere quali strade, ferrovie etc. richiede la disponibilità di grandi quantità di materiale.

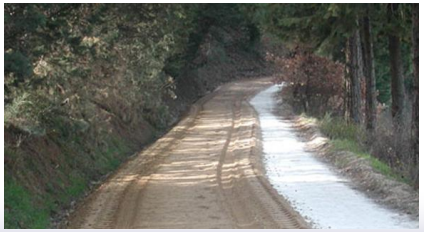
Problemi

Reperibilità sempre più difficoltosa e costi elevati.

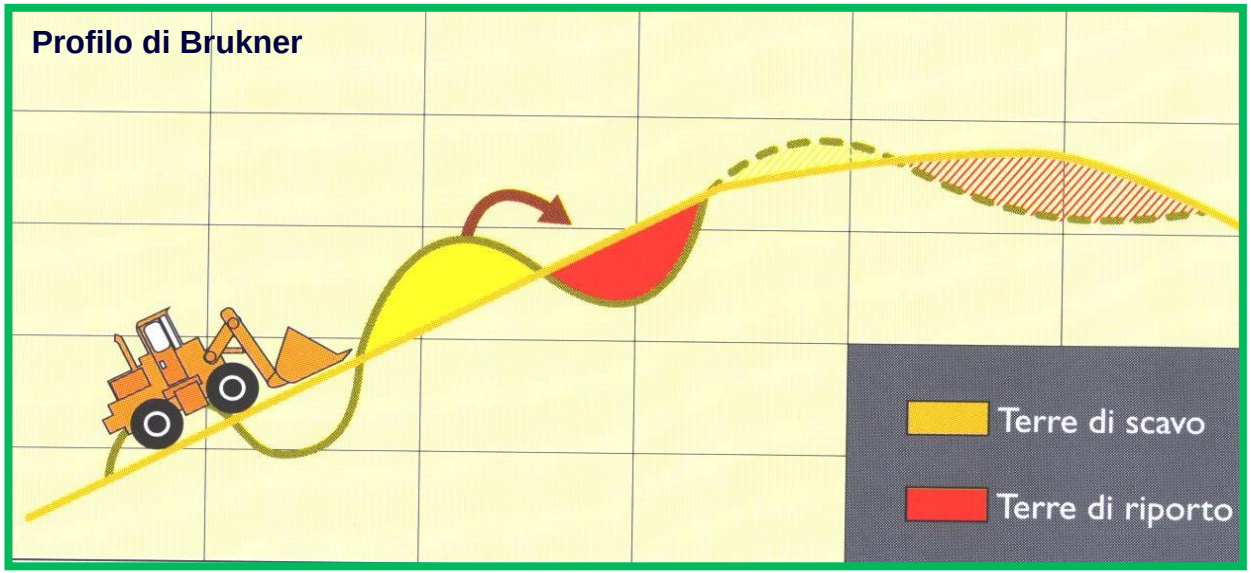
Problematiche ambientali

Soluzione

Recuperare per l'impiego svariati tipi di terre altrimenti inutilizzabili ricorrendo alle tecniche di stabilizzazione delle terre



La valenza ambientale



- Eliminazione del conferimento a discarica delle terre provenienti dai livellamenti e dagli scavi di trincee o gallerie che risultino trattabili
- Drastica riduzione delle cave di prestito funzionali all'opera
- Consistente diminuzione dei trasporti su strada e dei relativi problemi.

La valenza economica

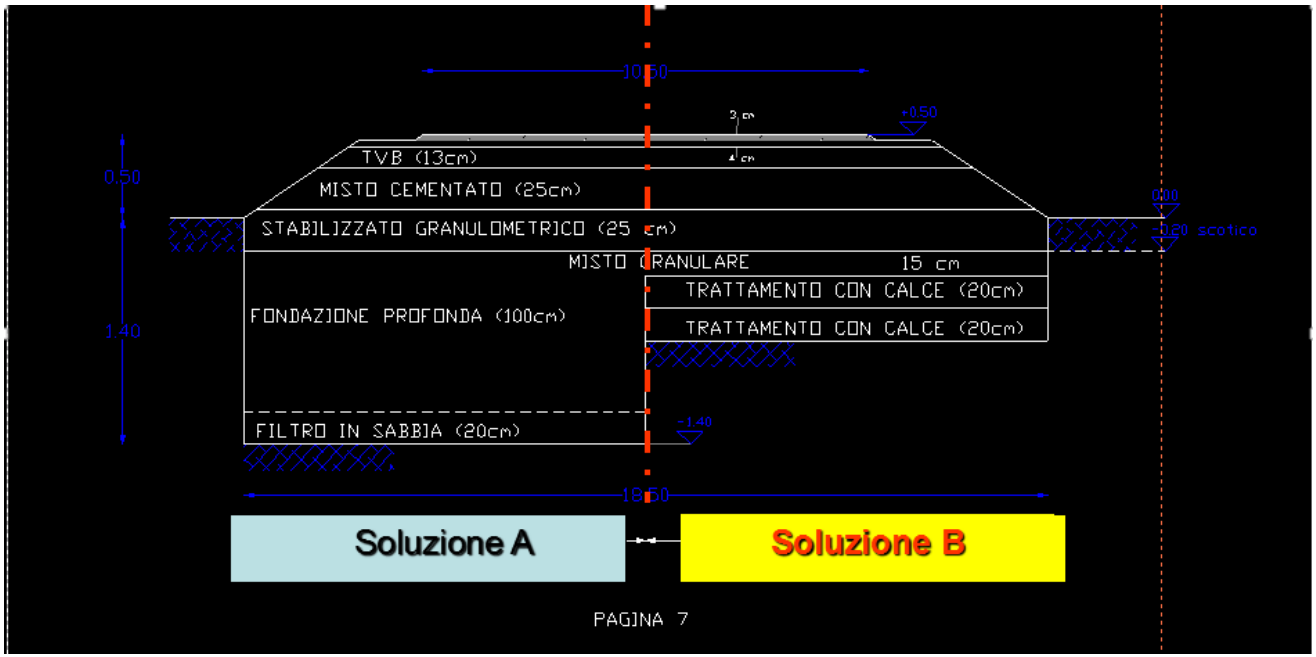
University of Parma

- Eliminazione della quota delle terre che si sarebbero dovute approvvigionare con la tecnica tradizionale
- Riduzione degli oneri per il conferimento a discarica delle terre di scarto
- L'uso della calce per la predisposizione delle piste e delle aree di lavoro consente l'agibilità dei cantieri subito dopo la cessazione del rischio di gelo, ampliando così il numero di giorni all'anno di operatività.
- Riduzione degli oneri per il conferimento a discarica delle terre di scarto

La valenza economica

University of Parma

RIPROGETTAZIONE DELL'INTERO CORPO STRADALE



Dal computo metrico estimativo delle due soluzioni equivalenti risulta che la sezione B (quella trattata con la calce) consente di risparmiare il 25% sul costo totale dell'opera e il costo di bonifica si riduce del 58%

Costi minimi di lavorazione

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

1 Spandilegante
1 Pulvimixer
1 Autobotte per l'acqua
1 Rullo a piede di montone
1 Rullo liscio
1 Grader

3,5 – 3,8 €/m^3 +
spese generali e utili di impresa.

Costi minimi 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:

$$1{,}7\ t/m^3 \times 3\% \times 70{,}00 - 80{,}00\ €/t = \mathbf{3{,}6 - 4{,}1\ €/m^3}$$

In totale, considerando una produzione media di 1200 - 1500 m^3/giorno, ed una miscela al 3% di calce si hanno:

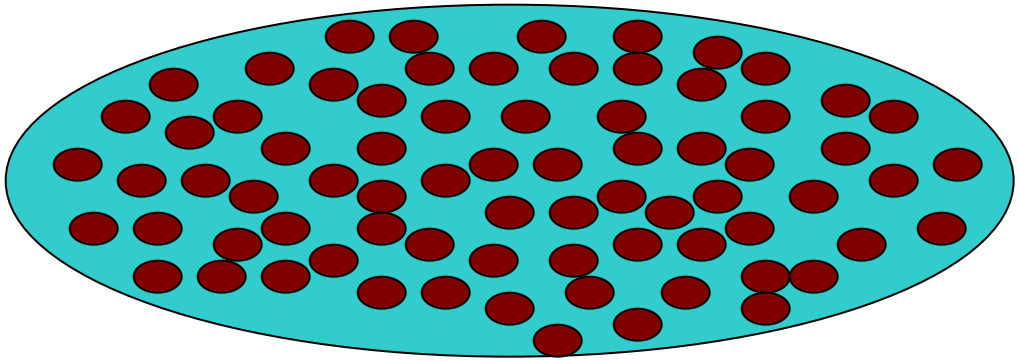
7,10 – 7,90 €/m^3 + spese generali + utili di impresa

Principio base della stabilizzazione a calce

University of Parma

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 1μm) dispersa in una fase continua



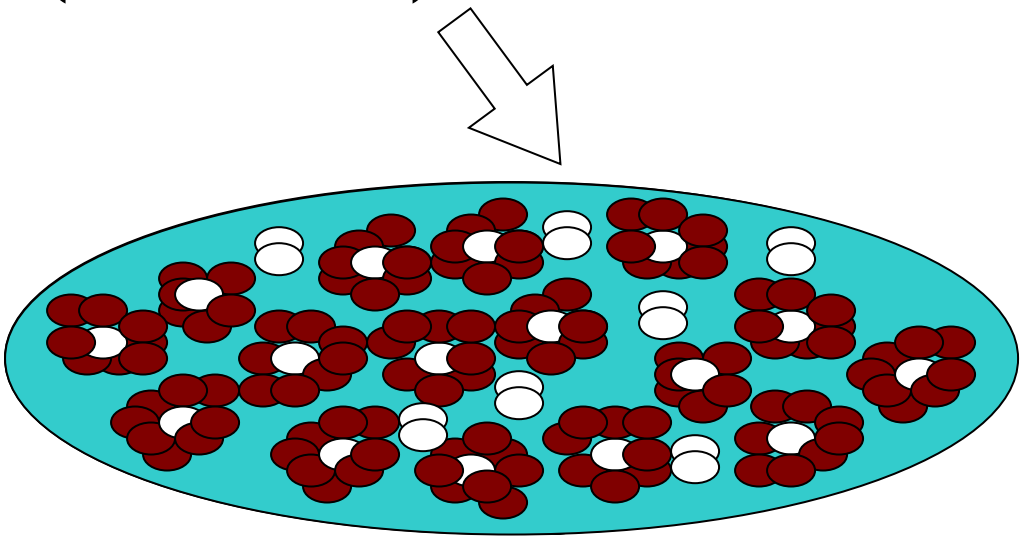
Dimensione particella		
$< 10^{-9}$ m	$10^{-9} \div 10^{-6}$ m	$> 10^{-6}$ m
Soluzione omogenea	Colloide	Sospensione eterogenea

Principio base della stabilizzazione a calce

University of Parma

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

$Ca(OH)_2$
(Calce Idrata)



2÷3 ore dopo la miscelazione

Flocculazione dell'argilla

In acqua la calce si divide in ioni Ca^{2+} e OH^-

Gli ioni OH^- aumentano il pH della soluzione

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

Reazioni pozzolaniche

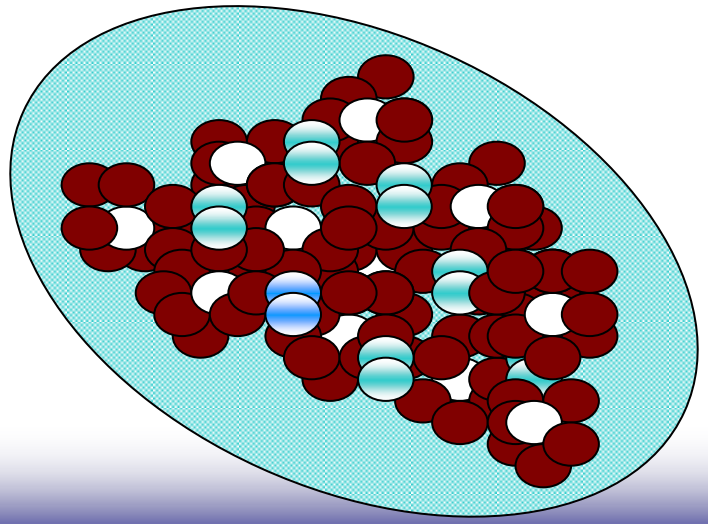
University of Parma

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

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

$$Ca^{2+} + OH^- + SiO_2 \text{ (}\textit{silice dell'argilla solubile}\text{)} \rightarrow \textbf{CSH (}\text{calcio silicato idrato}\textbf{)}$$

$$Ca^{2+} + OH^- + Al_2O_3 \text{ (}\textit{allumina dell'argilla solubile}\text{)} \rightarrow \textbf{CAH (}\text{calcio alluminato idrato}\textbf{)}$$

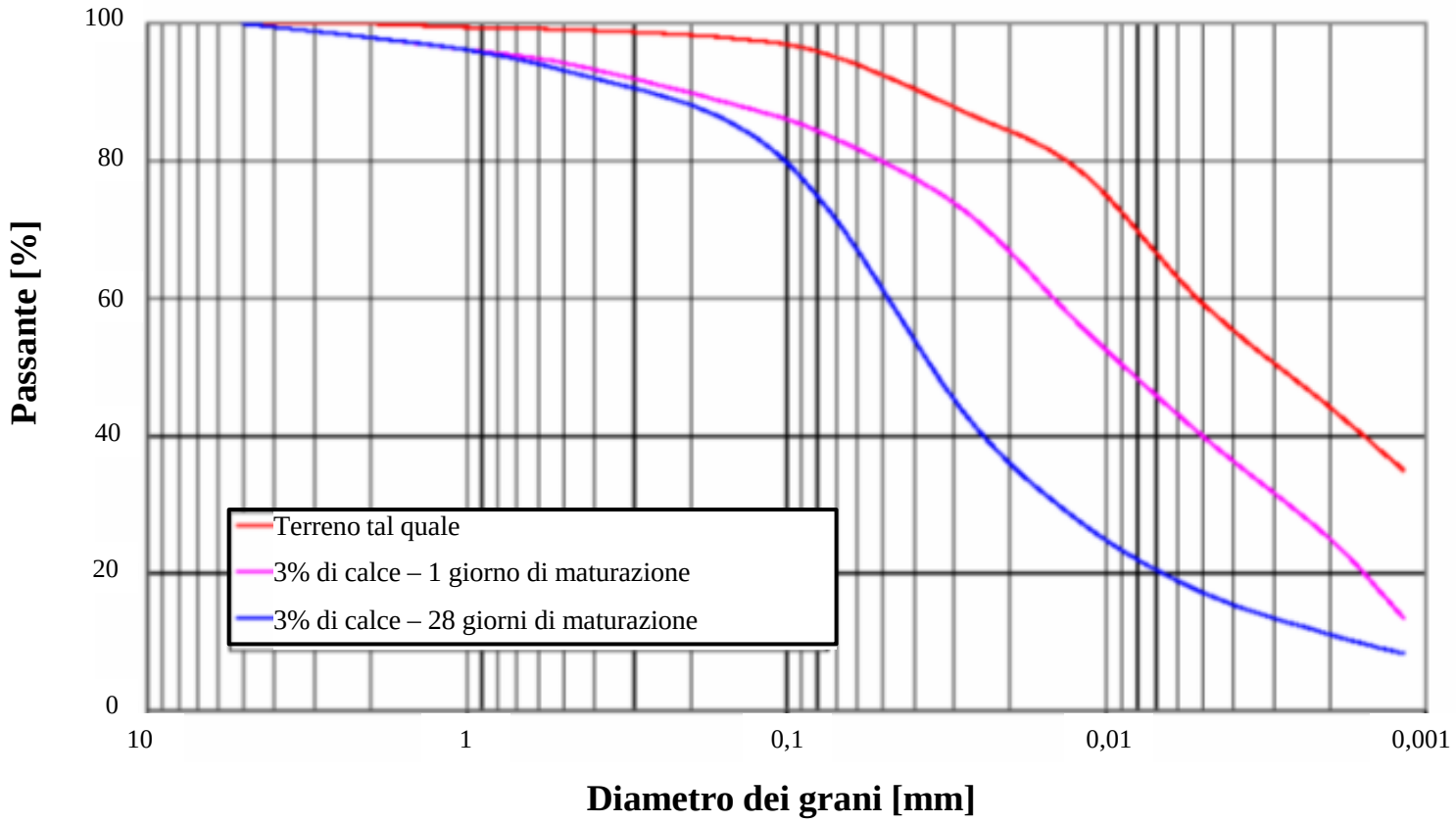


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

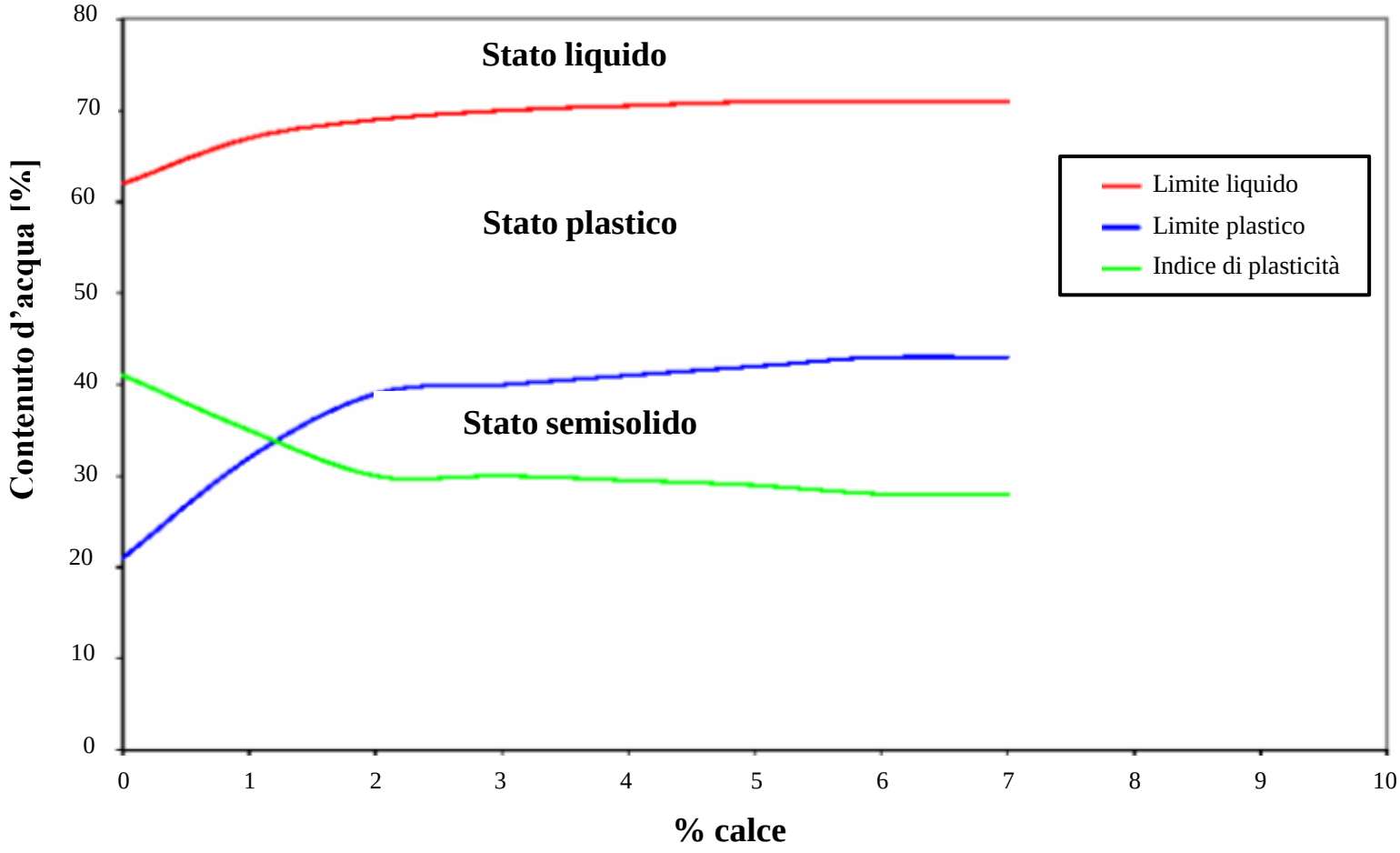
Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma



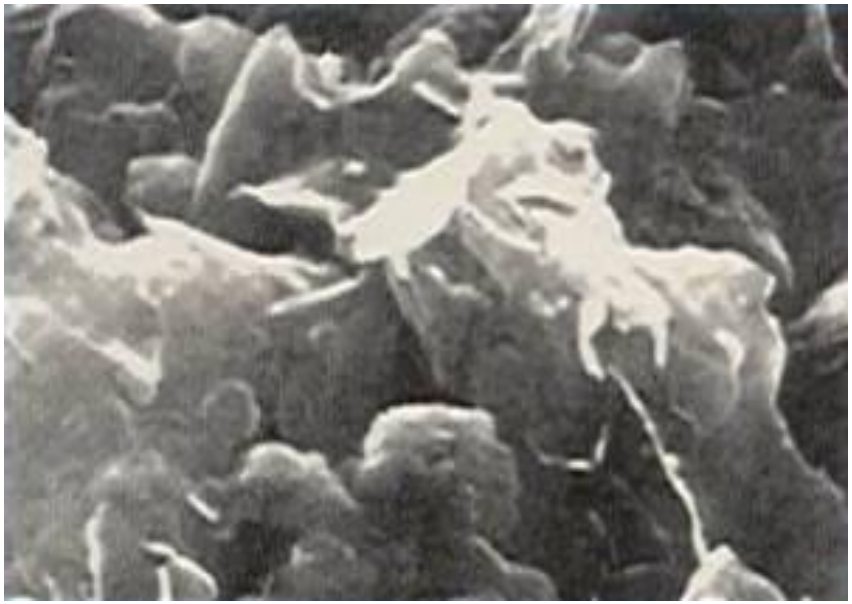
Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

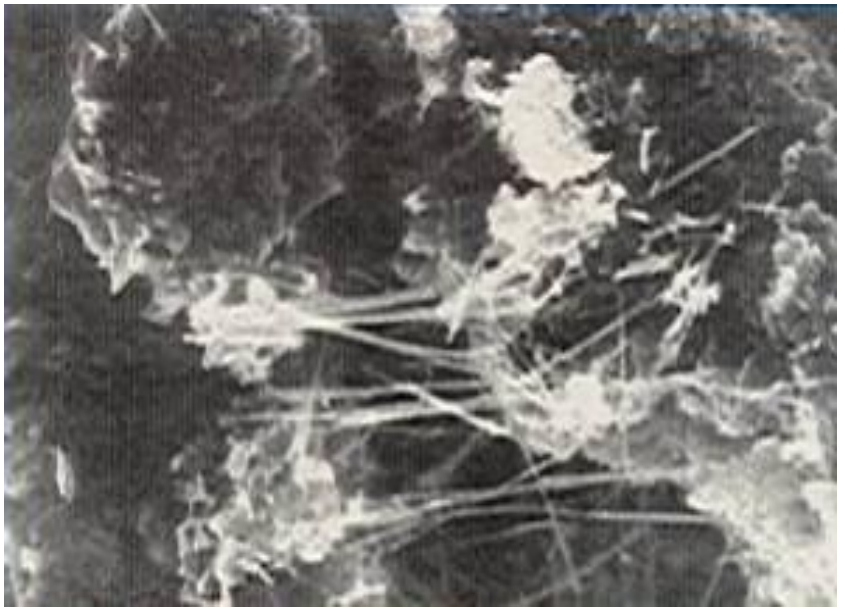


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma



Senza calce



Con calce

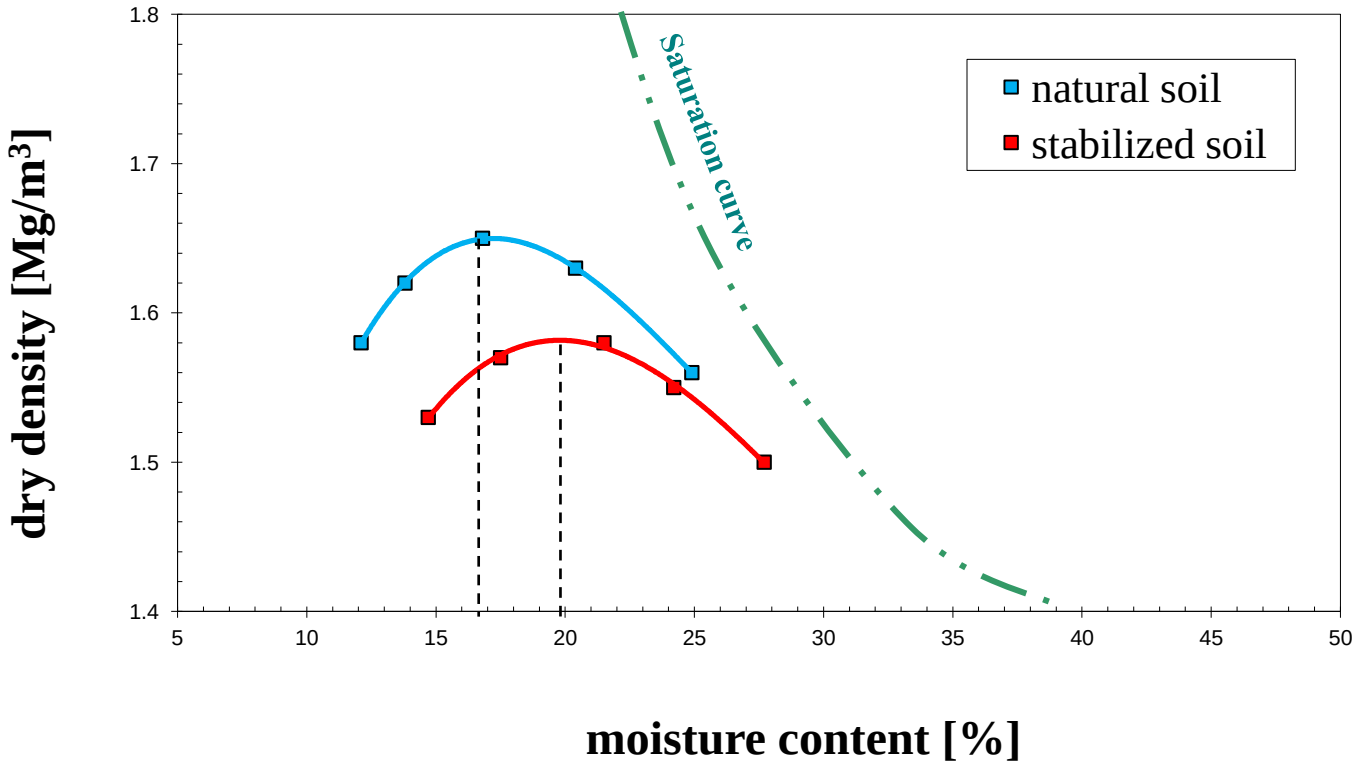
Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Aumento della compattabilità



$W_{opt.\ Terra\ stabilizzata} > W_{opt.\ Terra\ naturale}$

Tipologie di calce

University of Parma

- Calce idrata / idrossido di calcio [$Ca(OH)_2$]

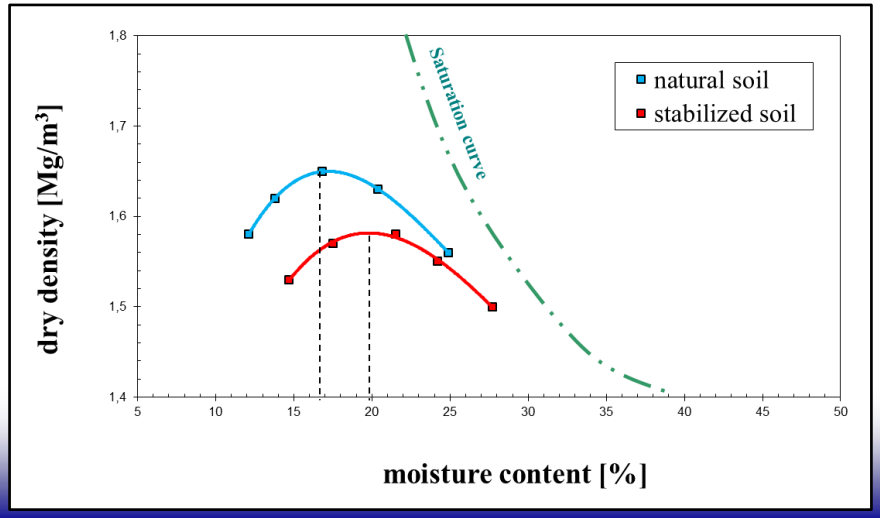
- Calce viva / ossido di calico [CaO]

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15.5\ kCal$$

- "lime slurry" [$Ca(OH)_2$ + acqua]

Latte di calce, Hydrated Lime Slurry; Calcium Hydroxide Slurry; Slurry; Milk of Lime

(per terre molto asciutte)



Calce viva per stabilizzazione

University of Parma

CL 90 – Ossido di Calcio Ventilato

Calce aerea viva calcica; Ossido di calcio; CaO; sostanza di purezza tecnica
Nome chimico e formula della sostanza principale: Ossido di calcio, CaO
Norma UNI EN 459-1:2010 "Calci da costruzione. Definizioni, specifiche e criteri di conformità".
Grado CL90-Q (R5, P1)
Specifica Italferr (gruppo Ferrovie dello Stato) revisione E novembre 2002
Capitolato Speciale di Appalto ANAS, Direzione generale, Roma 1998
Marcatura CE: CE 0785-CPR-11301-13; **Dop**: 0785-CPR-11301-OC1 Rev.0
Regolamento (CE) N. 1272/2008, CLP:
STOT S.E. cat. 3, inalazione; irritazione della pelle cat. 2; lesioni oculari cat.1
Regolamento (CE) N. 1907/2006, REACH:
Sostanza registrata presso l'Agenzia Europea per le Sostanze Chimiche (ECHA) il 5 ottobre 2010.
Né la sostanza principale né le sostanze secondarie rientrano tra le SVHC da includere nell'Allegato XIV.

CARATTERISTICHE FISICHE DI RICONOSCIMENTO

Stato fisico:	Solido in polvere fine
Colore:	Bianco
Odore:	Nessuno

CARATTERISTICA	VALORE	METODO DI PROVA
Massa volumica apparente:	850-1000 kg/m^3	UNI EN 459-2:2010
Solubilità in acqua del CaO:	1,25 g/l	(20°C, acqua demineralizzata priva di CO_2)
pH della soluzione satura:	12,5	(25°C, acqua demineralizzata priva di CO_2)

CARATTERISTICHE FISICHE E CHIMICHE A SPECIFICA (*)

CARATTERISTICA	VALORE	METODO DI PROVA
Passante al setaccio da 2 mm:	100%	UNI EN 459-2:2010
Passante al setaccio da 0,200 mm:	≥ 95%	UNI EN 459-2:2010
Passante al setaccio da 0,090 mm:	≥ 85%	UNI EN 459-2:2010
(CaO + MgO) totale:	≥ 90%	UNI EN 459-2:2010
di cui MgO totale:	≤ 7%	(**) UNI EN 459-2:2010
Calce disponibile (CaO disponibile):	≥ 80%	UNI EN 459-2:2010
CO_2 residua ($CaCO_3$ residuo):	≤ 4%	(≤ 9,1%) Calcimetro o strumento automatico IR tipo ELTRA o LECO
S (SO_3) totale:	≤ 0,8%	(≤ 2%) Strumento automatico IR tipo ELTRA o LECO
Reattività all'acqua t_{60}:	< 10 min	UNI EN 459-2:2010

(*) Per campioni prelevati in stabilimento, prima del carico in autobotte o del confezionamento.
(**) Con prova di stabilità superata secondo la EN 459-2.

Terre idonee alla stabilizzazione a calce

University of Parma

Una terra può essere stabilizzazta a calce se:

- *appartiene alle classi A6 o A7 secondo la ex UNI 10006;*
- *appartiene alle sotto classi A2-6 o A2-7*

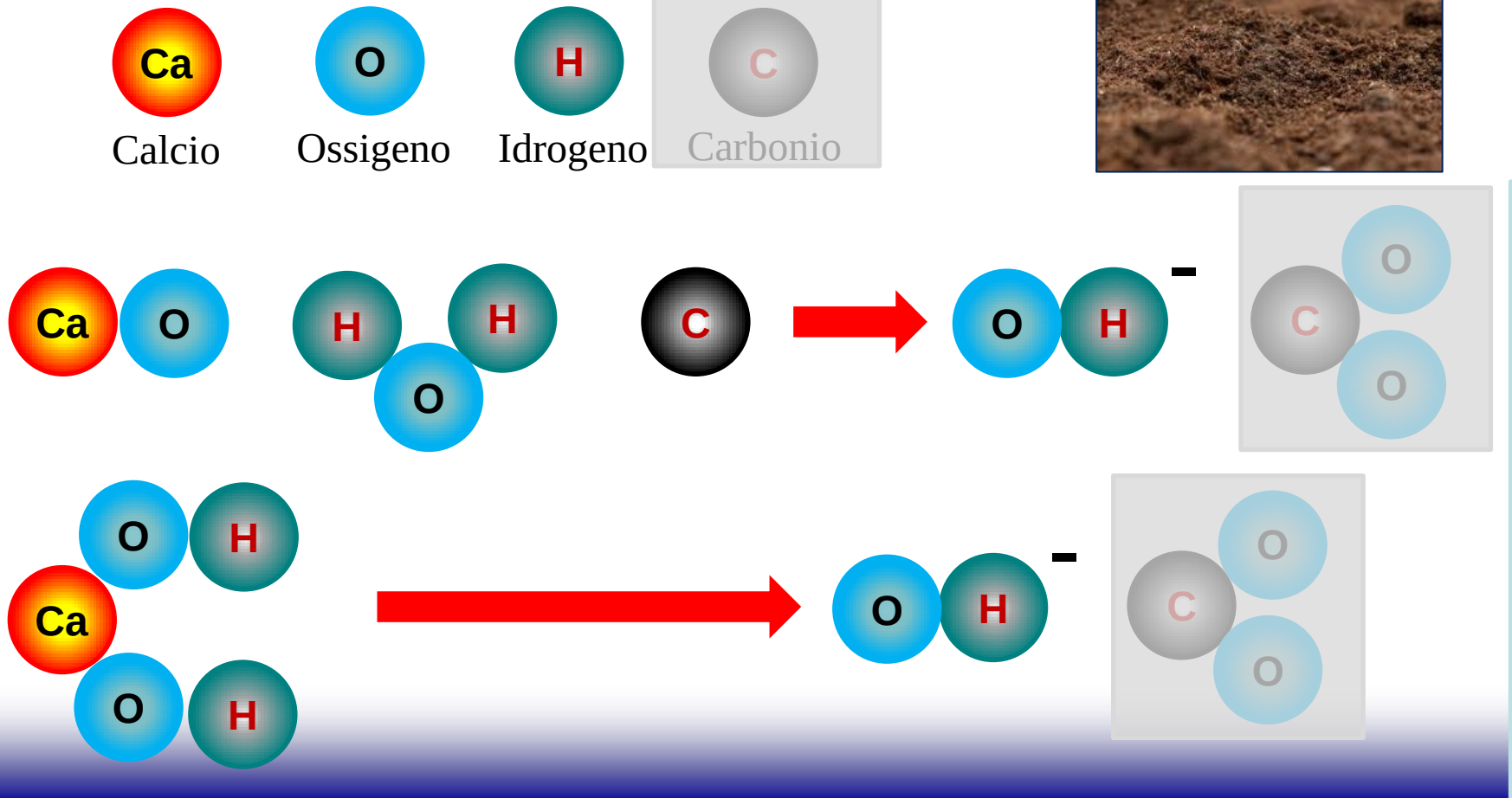
	COARSE-GRAINED SOILS passing to 0.075 sieve < 35%							FINE-GRAINED SOILS passing to 0.075 sieve > 35%			
CLASS	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7
SUBCLASS	A1-a	A1-b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				
< 2.00 mm	< 50										
< 0.42 mm	< 30	< 50	> 50			> 35 %					
< 0.075 mm	< 15	< 25	< 10	< 35	< 35	< 35	< 35	> 35	> 35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

Terre idonee alla stabilizzazione a calce

University of Parma

Terreno con assenza o ridotto contenuto di sostanze organiche

*Si definisce **composto organico un composto in cui uno o più atomi di carbonio** sono uniti tramite legame covalente ad atomi di altri elementi (principalmente idrogeno, ossigeno, azoto)*

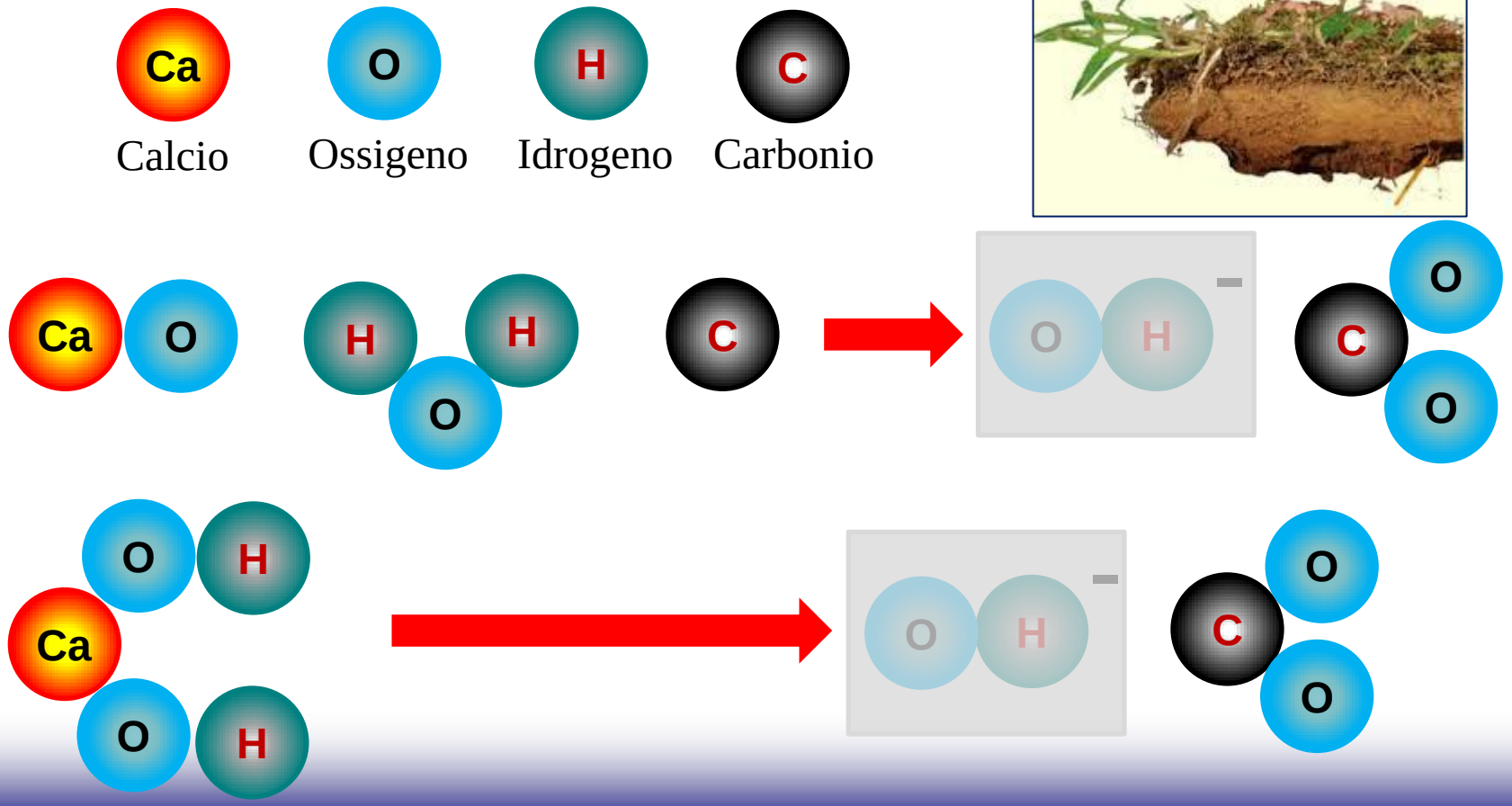


Terre idonee alla stabilizzazione a calce

University of Parma

Terreno con elevato contenuto di sostanze organiche

*Si definisce **composto organico un composto in cui uno o più atomi di carbonio** sono uniti tramite legame covalente ad atomi di altri elementi (principalmente idrogeno, ossigeno, azoto)*



Terre idonee alla stabilizzazione a calce

University of Parma

Contenuto di sostanze organiche:

- Valutazione per ossidazione con bicromato di potassio (AFNOR NF 94-055), S.O.< 2% in peso, si può accettare S.O.< 4% nel caso di grandi rilevati e con uno studio che comprovi il soddisfacimento dei limiti prestazionali

- Valutazione per calcinazione a 440°C ± 22°C. (ASTM D 2974-C)
  S.O.< 4% peso

Contenuto in sali di zolfo
Il contenuto totale di solfati e solfiti valuato secondo la norma UNI 8520 parte 11 deve essere inferiore allo 0.25% in peso.
In casi eccezionali terre con contenuto di solfati tra 0.25% e 1% possono essere acetate sulla base di uno specifico studio di laboratorio.
Terre con contenuto di solfati superior all'1% non possono essere accettate.

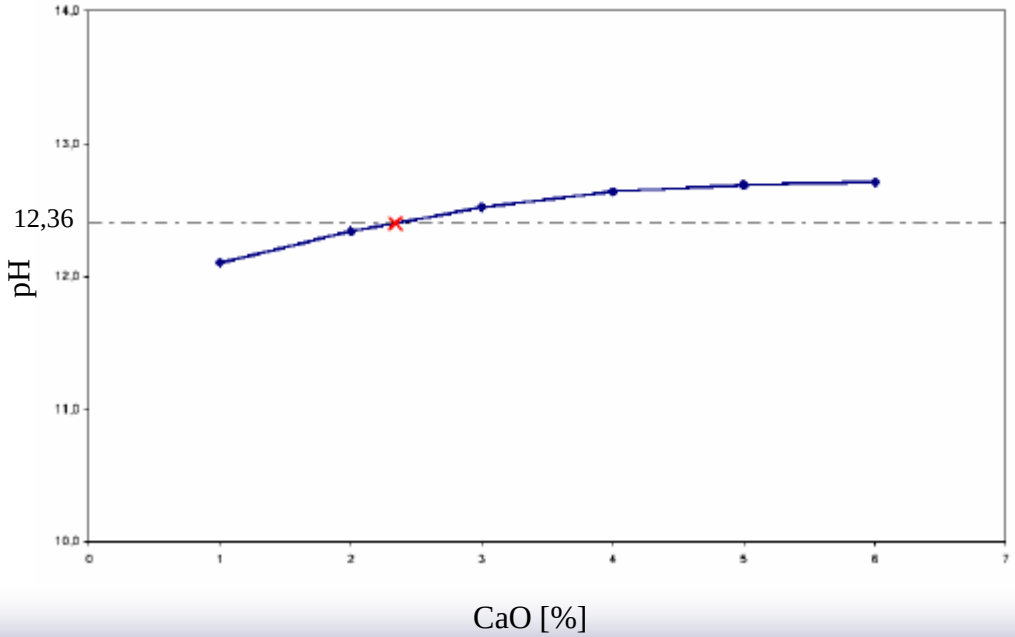
Contenuto di nitrati: inferiore dello 0.1% in peso.

Terre idonee alla stabilizzazione a calce

University of Parma

Valutazione del consumo immediato di calce

Il consumo immediate di calce (**la quantità di calce richiesta per far avvenire le reazioni immediate tra terra e calce in relazione con la capacità di scambio ionico dei materiali argillosi**) è valutata secondo la norma ASTM C977-92 e deve essere almeno il 2% (1,5% +0,5%)



Calce 2%

Calce 2.5%

Calce 3%

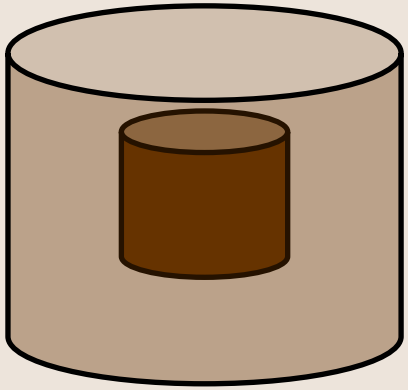
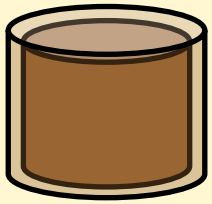
Calce 3.5%

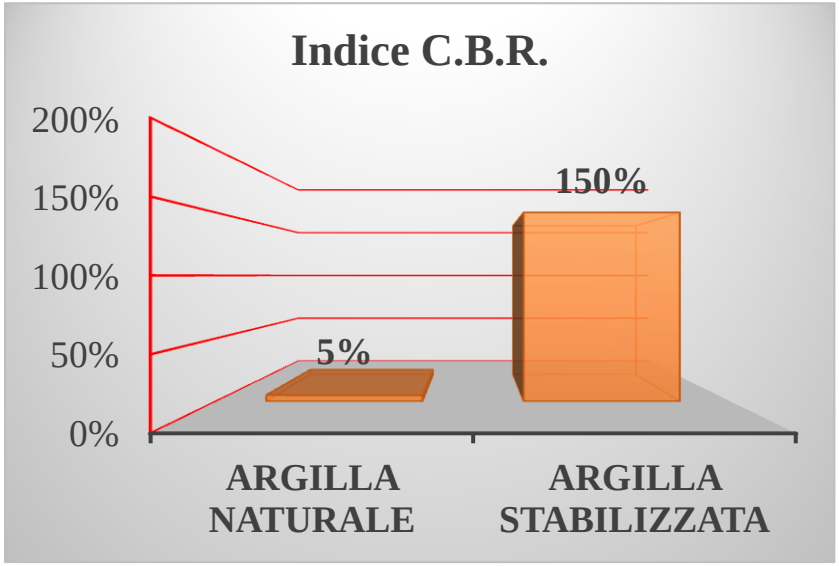
Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Perdita della sensibilità all'acqua

7 giorni all'aria + 4 giorni in immersione

Argilla naturale		**Indice di rigonfiamento** **15%**
Argilla stabilizzata		**0,1%**

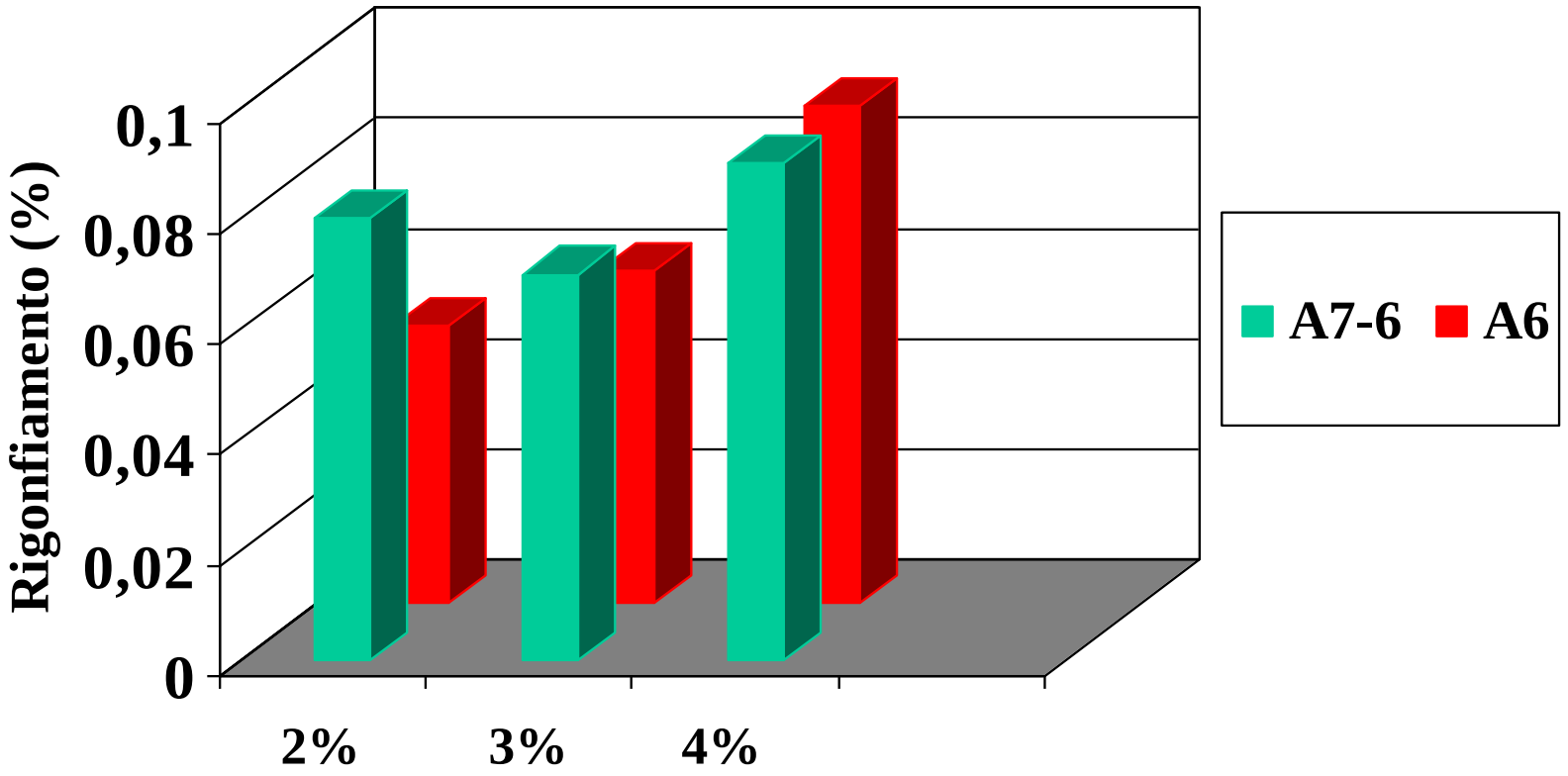


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Perdita della sensibilità all'acqua

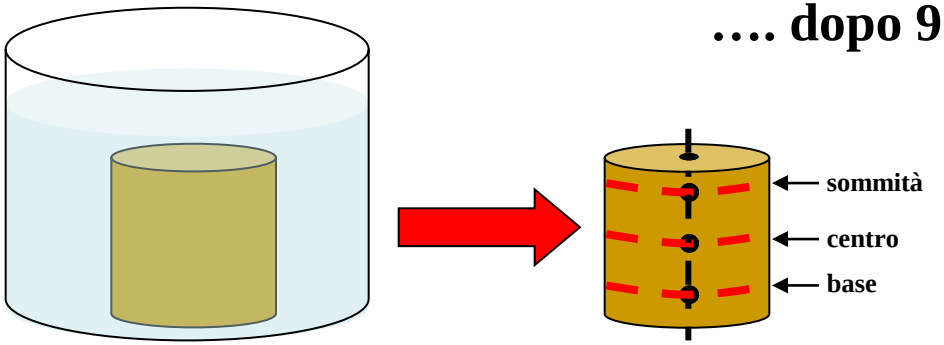
7 giorni all'aria + 4 giorni in immersione



Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Perdita della sensibilità all'acqua

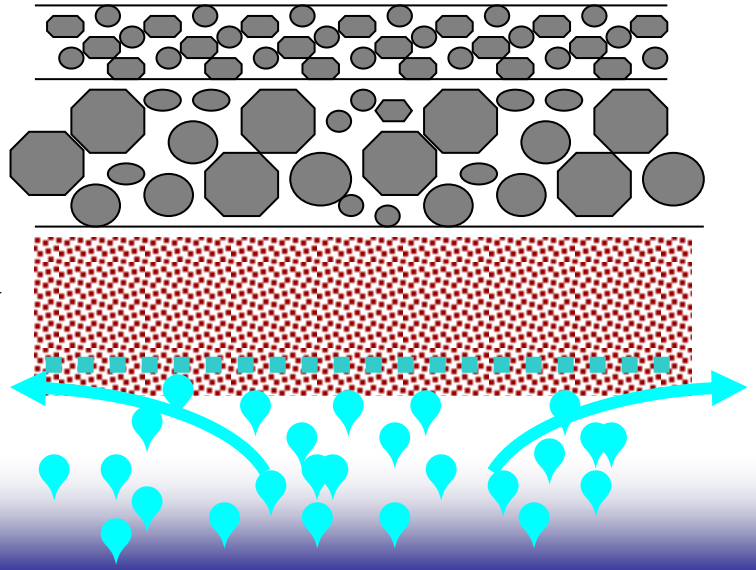


…. dopo 96 ore in immersione in acqua

	base	centro	sommità
W_{96h}%	16.93	15.91	16.85
W% prima dell'immersione: 16.0			

CNR UNI 10009

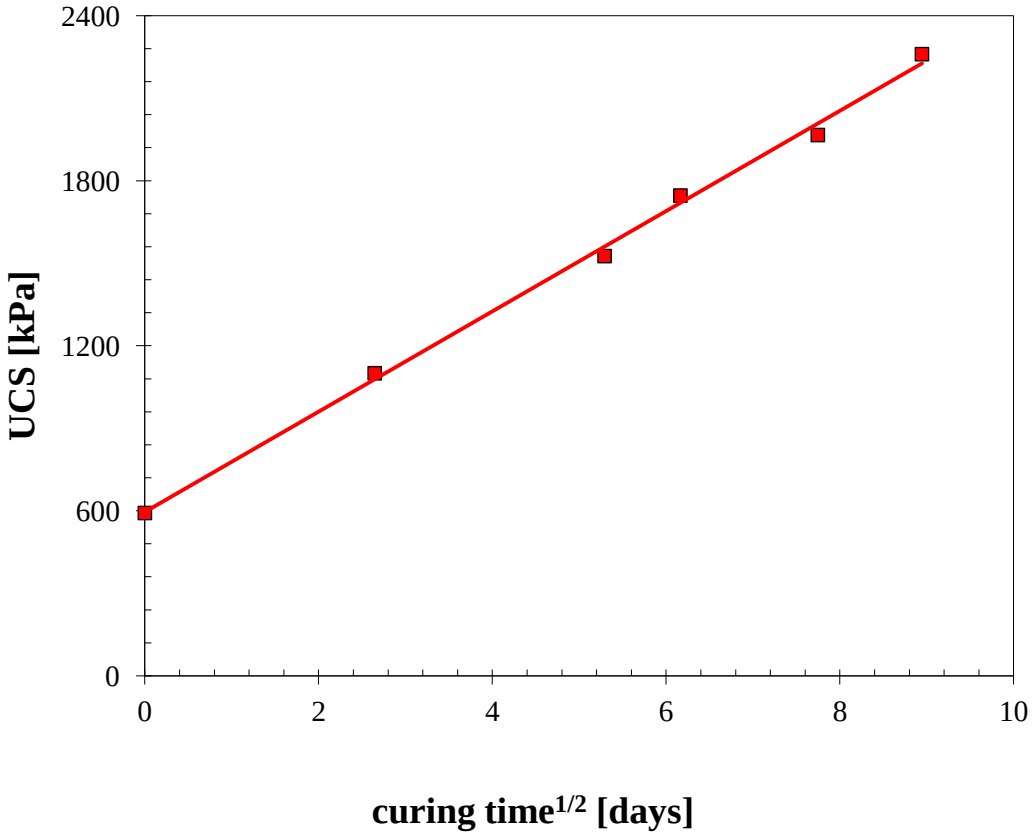
La terra stabilizzata a calce
è impermeabile e
blocca le risalite capillari

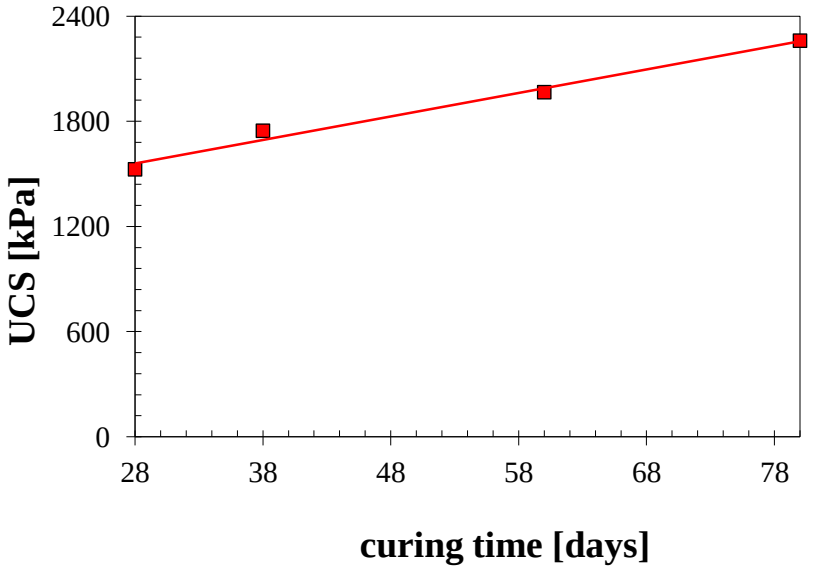


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Prestazioni meccaniche

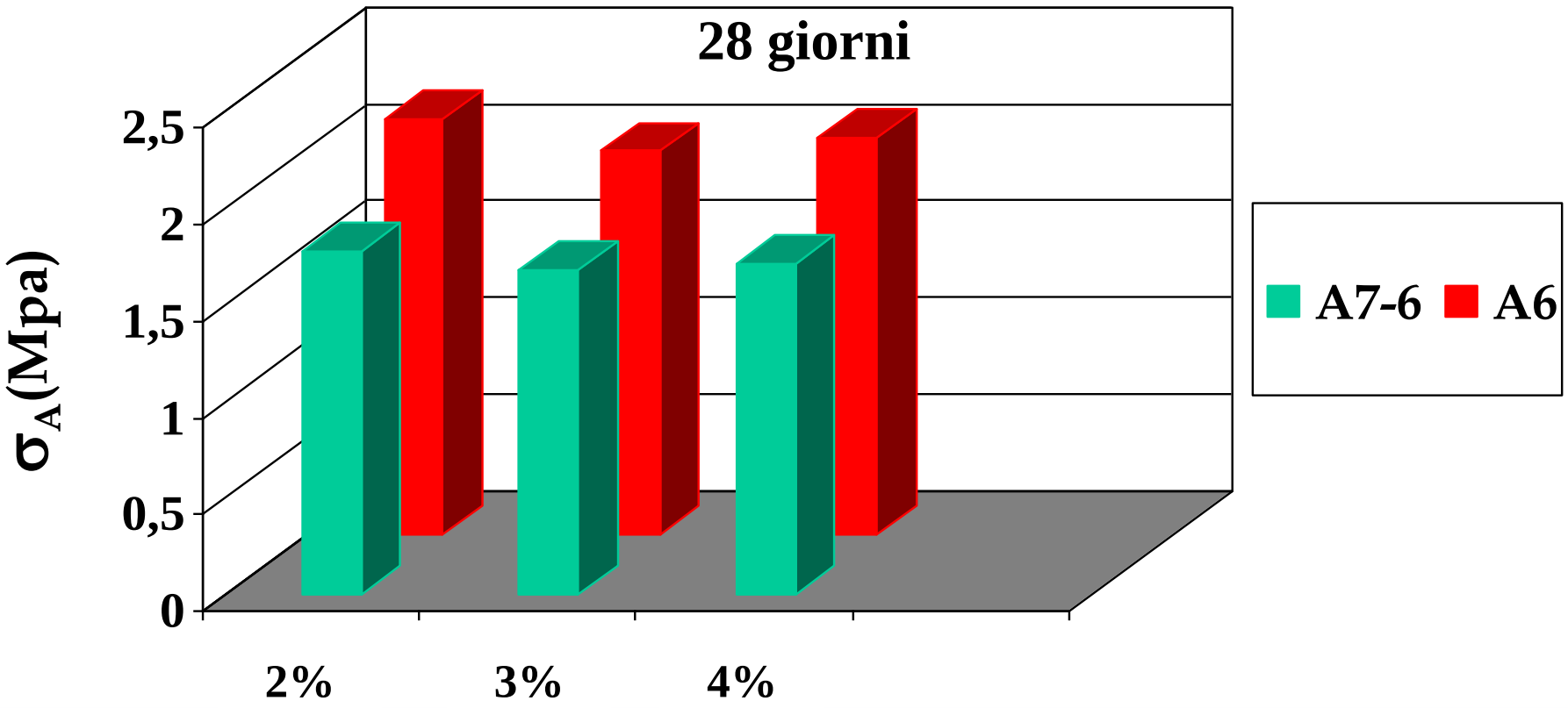




Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Prestazioni meccaniche
(Prova di compressione ad espansione laterale libera)

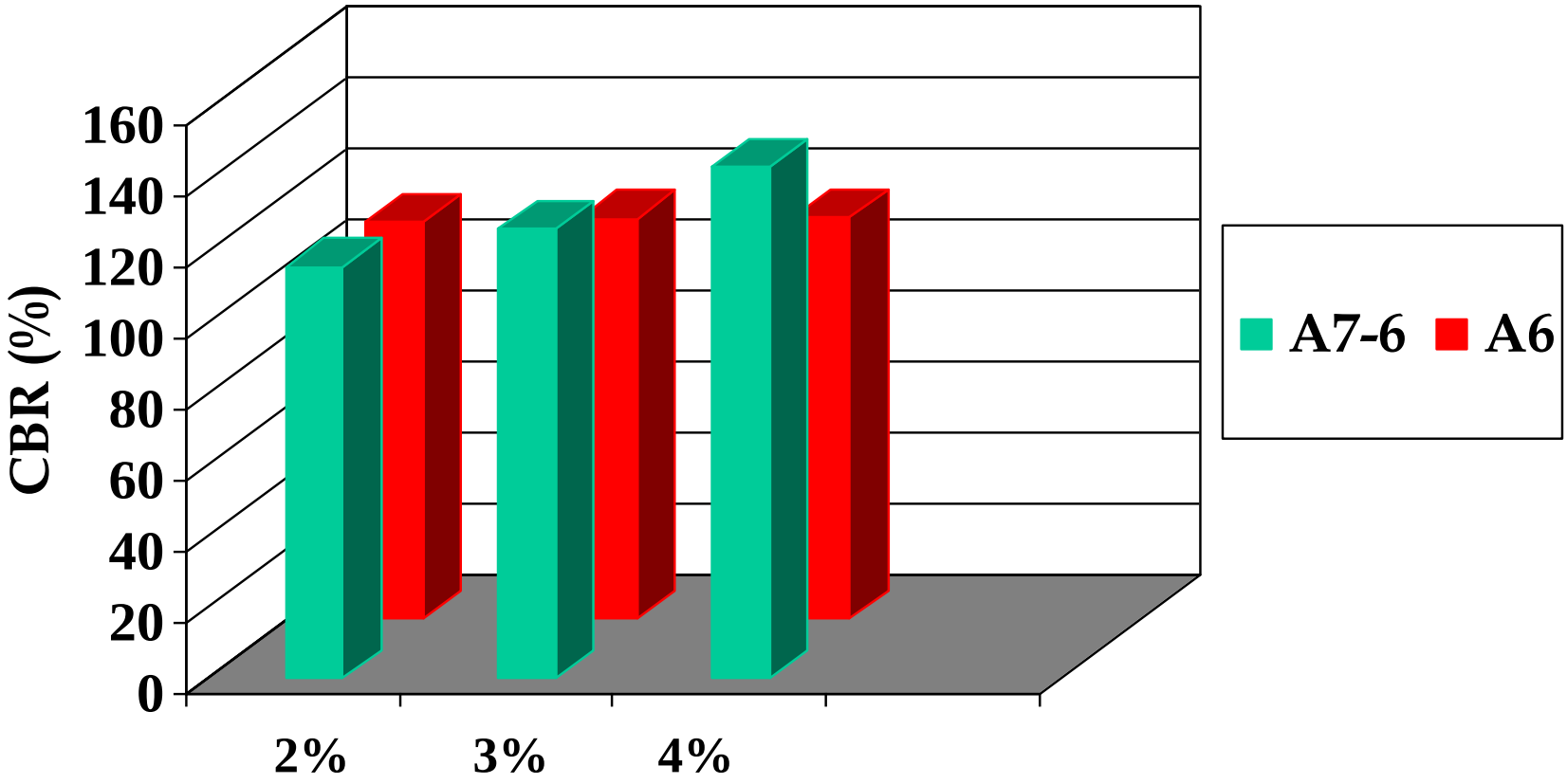


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Prestazioni meccaniche

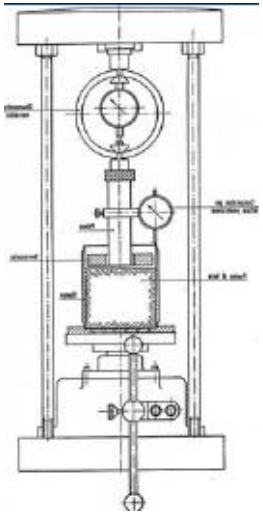
7 giorni all'aria

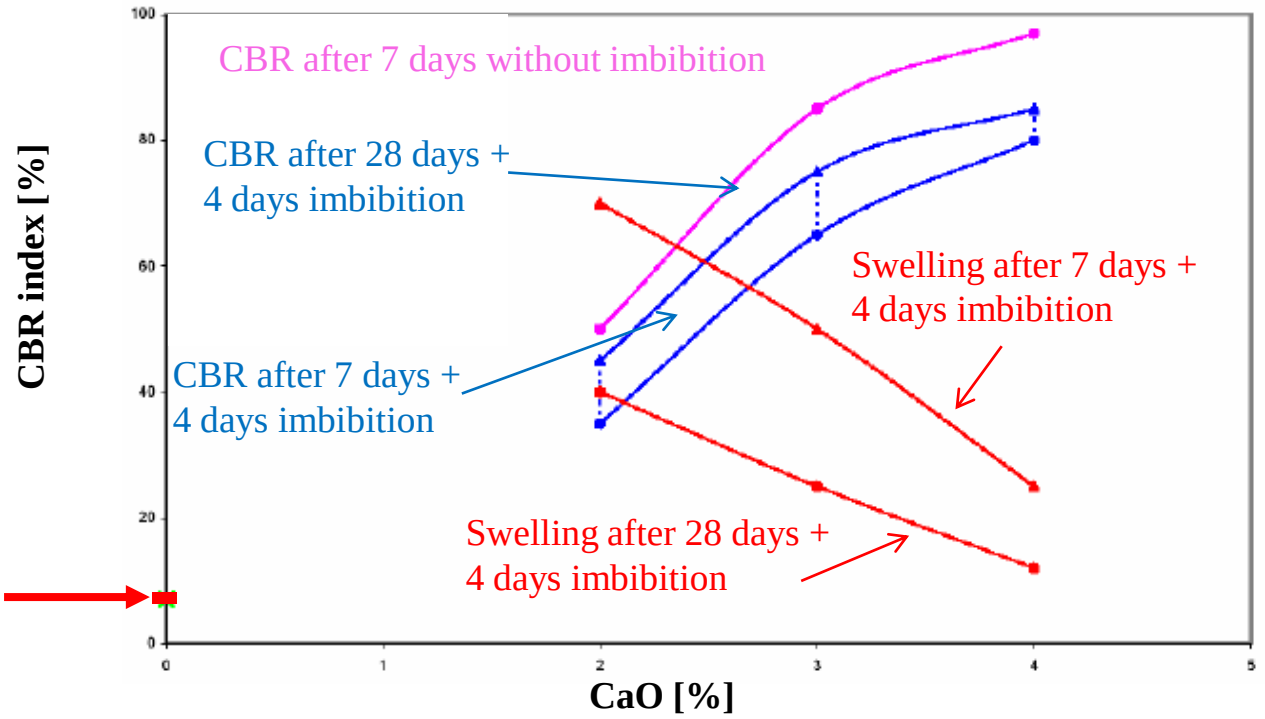


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Prestazioni meccaniche



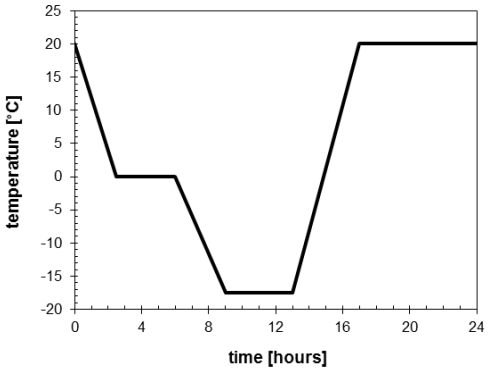


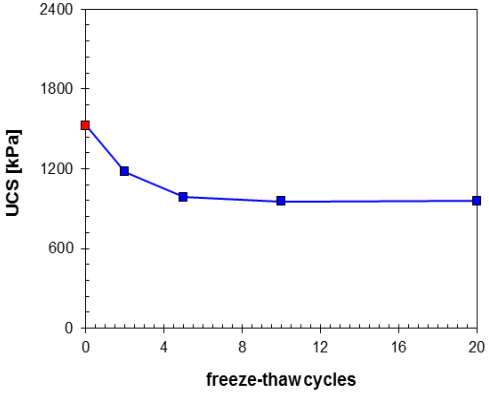
Prova CBR (ASTM D1883-05; AASHTO T193)

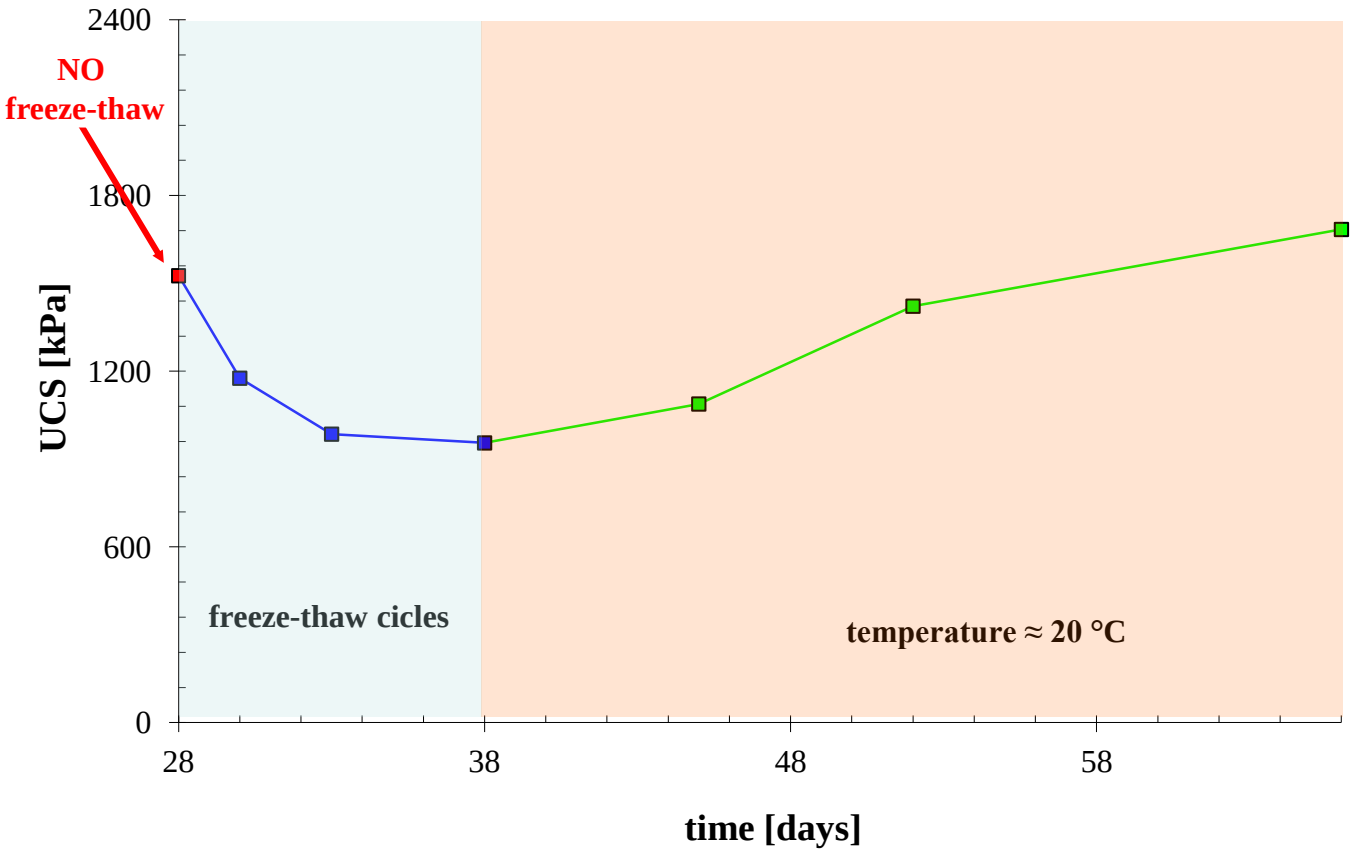
Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Effetti del gelo/disgelo



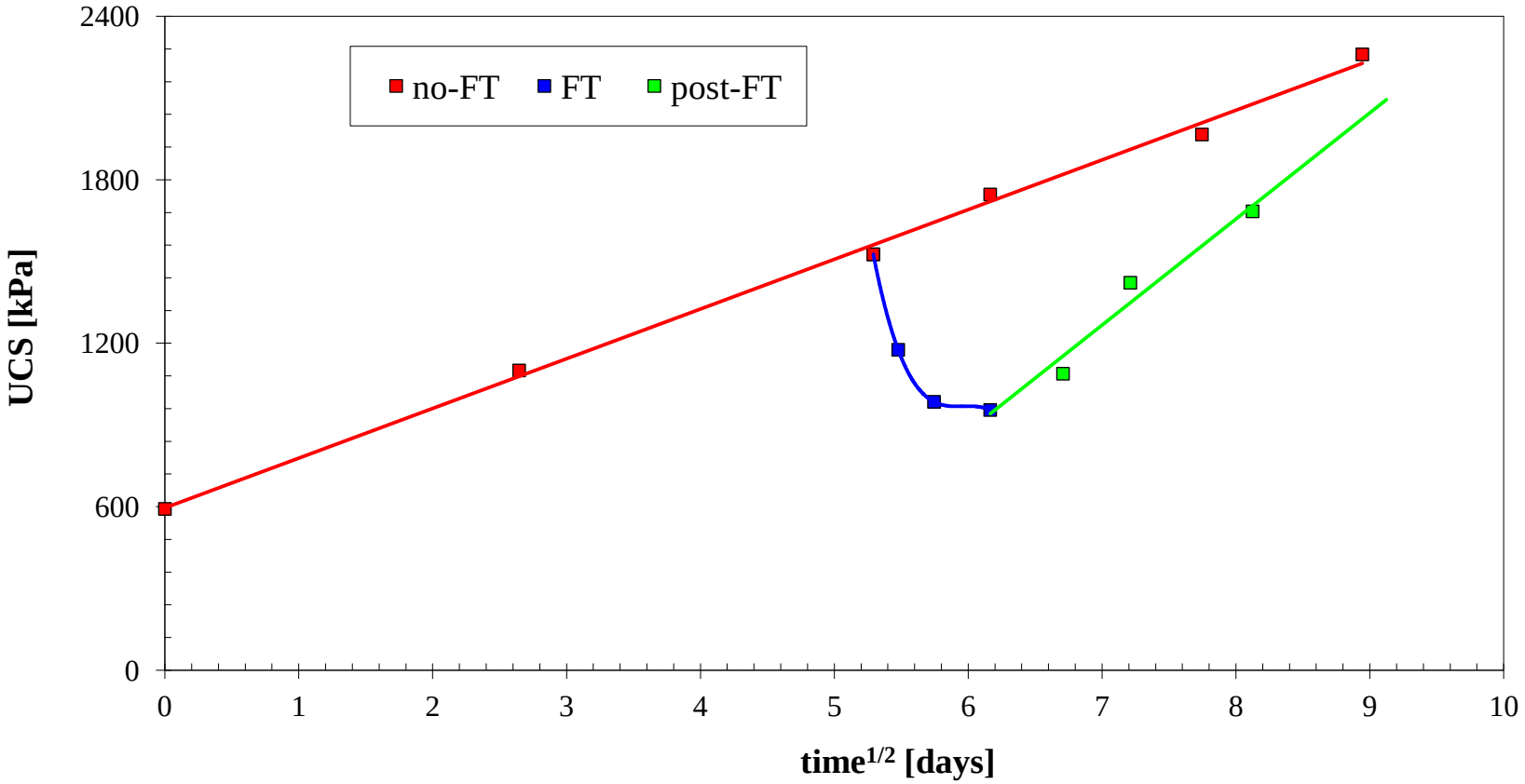




Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

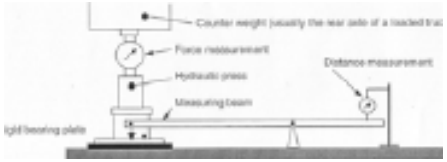
Effetti del gelo/disgelo

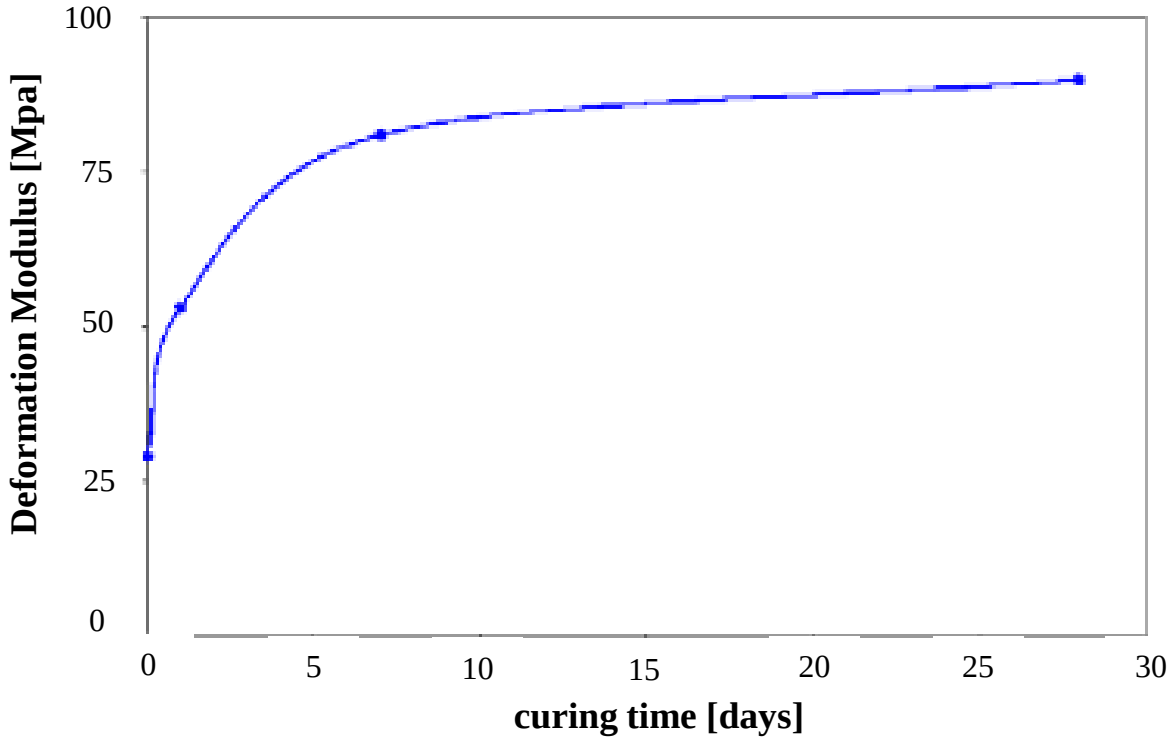


Effetti della stabilizzazione a calce

University of Parma

Prova di carico su piastra





Mix Design

University of Parma

Fase 1 – Classificazione della terra

Test: limiti di Atterberg e analisi granulometrica

⇒ **solo le terre argillose (A_7 and A_6) o le terre con elevato contenuto di argilla (A_{2-6} e A_{2-7}) possono essere stabilizzate a calce, negli altri casi la calce produce solo una riduzione del contenuto d'acqua**

	COARSE-GRAINED SOILS passing to 0.075 sieve < 35%							FINE-GRAINED SOILS 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

Fase 2 – Valutazione dell'attitudine della terra alla stabilizzazione

Test: Consumo Immediato di Calce (C.I.C. - ASTM C977)
Determinazione del contenuto di sostanze organiche (ASTM D 2974-C)

⇒ **Solo le terre con "C.I.C. non inferiore a 1.5% e contenuto di sostanze organiche non superiore a 4% possono essere efficacemente stabilizzate a calce**

⇒ **Valori anomali del consumo immediato di calce possono significare che non tutte le particelle fini della terra sono argillose oppure che l'argilla non è reattiva.**

⇒ **Un alto contenuto di sostanze organiche può ostacolare le reazioni che realizzano la stabilizzazione perchè la calce "attaccca" loro anzichè reagire con le componenti argillose.**

Fase 3 – Definizione del contenuto ottimale di calce

La miscela “di primo tentativo” in genere è fatta con il C.I.C. + 0,5% (comunque non meno del 2%)

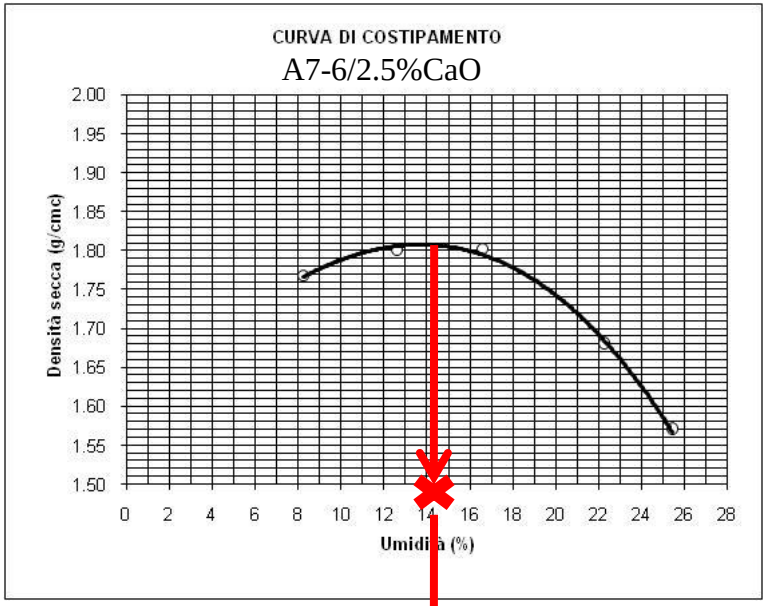
Test: Prova Proctor & CBR o Compressione ad E.L.L.

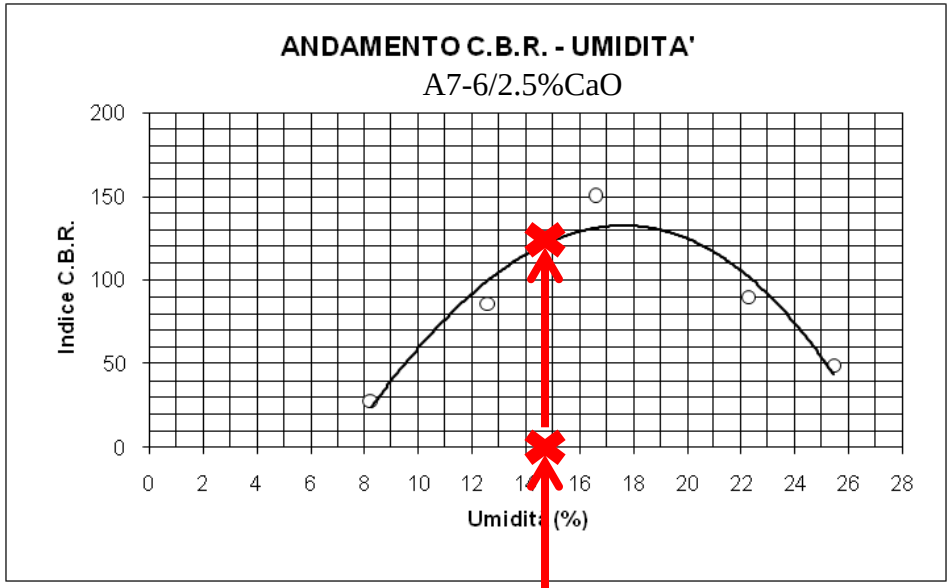
Questa procedura consiste nell’effettuare contemporaneamente la prova Proctor e la prova CBR (prova di compressione ad E.L.L.): gli stessi provini usati per la prova Proctor vengono usati per la prova CBR (prova di compressione ad E.L.L.),
Come risultato si ottengono la variazione di densità al variare del contenuto d’acqua e la variazione dell’indice CBR (della tensione di compressione) al variare del contenuto d’acqua).

Mix Design

University of Parma

Fase 3 – Definizione del contenuto ottimale di calce





W_{opt}

Fase 3 – Definizione del contenuto ottimale di calce

La miscela “di primo tentativo” in genere è fatta con il C.I.C. + 0,5% (comunque non meno del 2%)

Test: Prova Proctor & CBR o Compressione ad E.L.L.

Queste due prove danno due informazioni: una in merito alle caratteristiche meccaniche della miscela e una in merito all’efficacia della stabilizzazione.

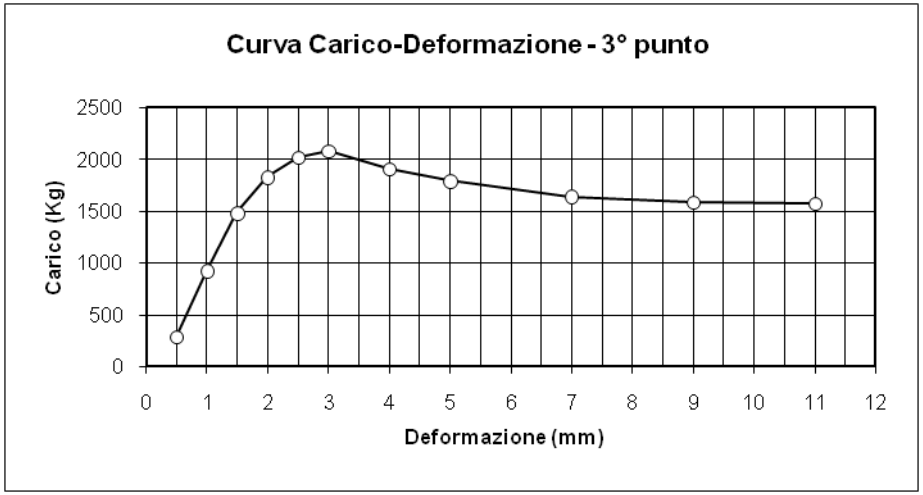
1. Dopo 7 giorni è avvenuta la gran parte delle reazioni tra terra e calce, quindi se dopo successive 4 giorni in immersione la miscela ha un indice CBR accettabile/buono questo significa che la miscela potrà garantire buone caratteristiche di portanza in esercizio.

2. Se dopo 4 giorni in acqua la miscela non mostra un significativo rigonfiamento (<1%) significa che la calce è sufficiente a stabilizzare tutta l’argilla.

Mix Design

University of Parma

Fase 3 – Definizione del contenuto ottimale di calce



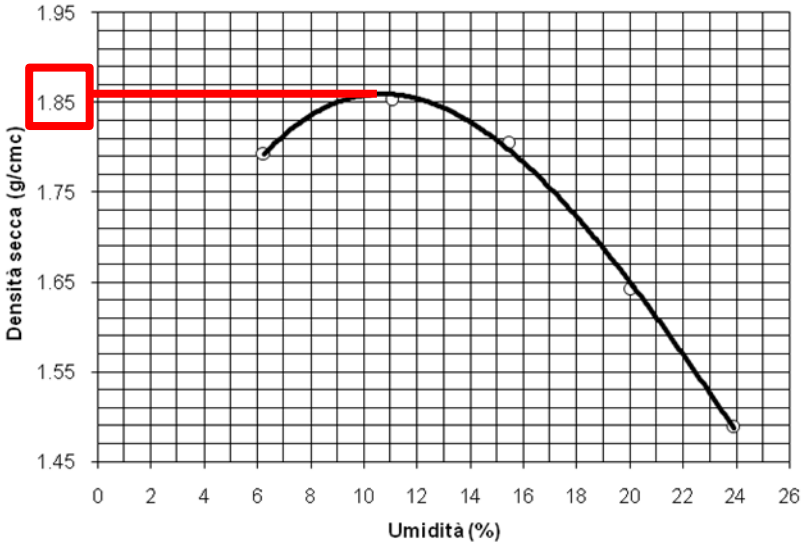
	Argilla stabilizzata	Argilla senza calce
Indice di rigonfiamento dopo 96 ore	0,14%	13,7%
Indice CBR	150%	4%

Mix Design

University of Parma

Fase 3 – Definizione del contenuto ottimale di calce

Test: Prova Proctor sul terreno tal quale per conoscere la densita originale e successivamente convertire in kg/m^2 la quantità di calce espresso in % in peso del terreno



calce: 2%

$$\text{Kg di calce per mq per 30 cm} = \left(\frac{30 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1.85}{1000}\right) \cdot 0.02 = 11{,}1$$

Fase 4 – Determinazione del quantitativo di calce “operativo”

Il mix design definisce il quantitativo di calce da stendere e il contenuto d’acqua della miscela (w_{opt} *Proctor).*

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 + 15.5\ kCal$$

Stoccaggio della calce in cantiere

University of Parma

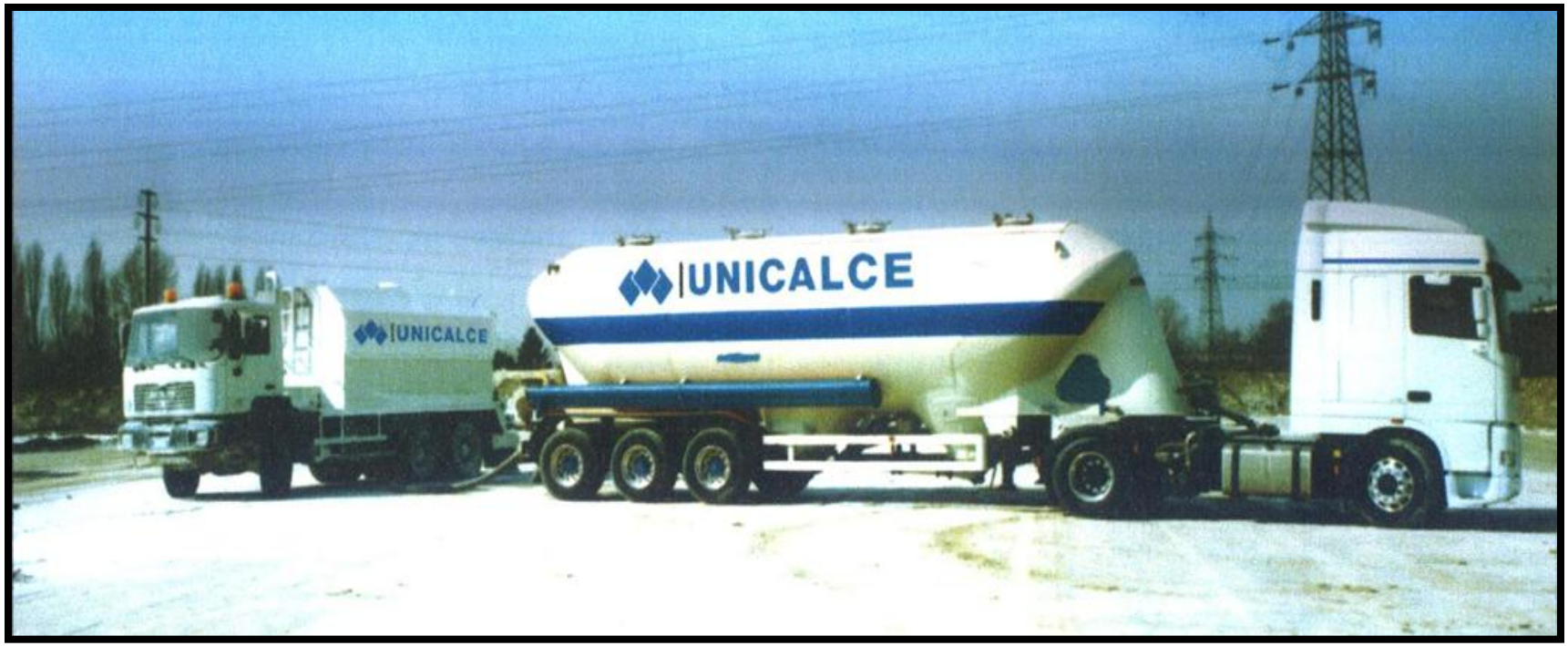
SILO VERTICALE FISSO, CON SCARICO MECCANICO

SILO ORIZZONTALE MOBILE, CON SCARICO PNEUMATICO

Per cantieri di medie e grandi dimensioni è indispensabile avere una riserva minima di calce pari ad almeno due giorni lavorativi; si evita il rischio di dover interrompere le lavorazioni per difficoltà di approvvigionamento del reattivo.

Arrivo del della calce

University of Parma



Il legante è trasferito pneumaticamente dall'autobotte al silo di cantiere; si carica direttamente lo spandilegante

Tecnica di esecuzione dei trattamenti con la calce

University of Parma

LO SCOTICO E LA POSA IN STRATI DELLA TERRA STABILIZZATA

- **L'esecuzione dei piani di posa richiede lo scotico del suolo naturale. Lo spessore dello strato da asportare dipende dal tipo di vegetazione esistente; normalmente si asportano 15-30, a volte fino a 50 cm di suolo.**

- **Nella costruzione dei rilevati, il giorno che precede il trattamento si posano le terre da lavorare con calce in strati di adeguato spessore; si preserva così l'umidità degli strati sottostanti.**

Stesa della calce

Lo spandimento dela calce si attua con macchine a traino o semoventi che assicurino un dosaggio costante per unità di superficie (kg/m^2) in funzione della velocità di avanzamento.

I moderni spandicalce sono anche dotati di sistema di controllo del dosaggio che può essere o volumetrico o elettronico.

La capacità di carico degli spandicalce varia da un minimo di 8 m^3 per il tipo a traino a 12-18 m^3 per il tipo semovente; la striscia posata è larga 2,2-2,4 m

Stesa della calce

Stesa della calce

University of Parma

Controllo del dosaggio di calce

University of Parma

E' molto importante dosare il reattivo in modo regolare evitando sia sovrapposizione delle strisciate sia carenze di copertura.

La verifica della quantità dosata (kg/m^2) si attua posizionando teli o contenitori di superficie nota (es. 1 m^2) e pesando la quantità di reattivo su di essi raccolta.

La quantità dosata in kg/m^2 è calcolata in funzione dello spessore e della densità finali dello strato da lavorare, al fine di ottenere la concentrazione prestabilita

Le più moderne macchine spandicalce permettono di stendere al suolo la calce con una precisione di più o meno mezzo kg per metro quadrato con il controllo elettronico.

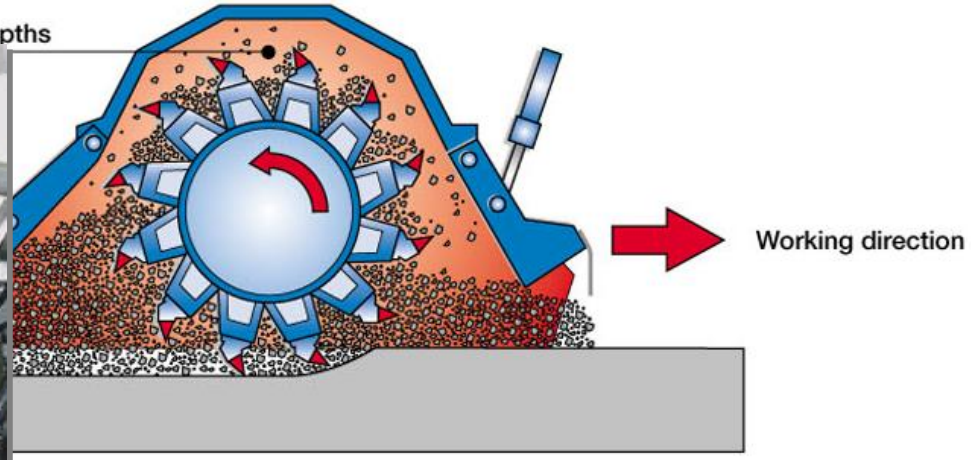
Miscelazione

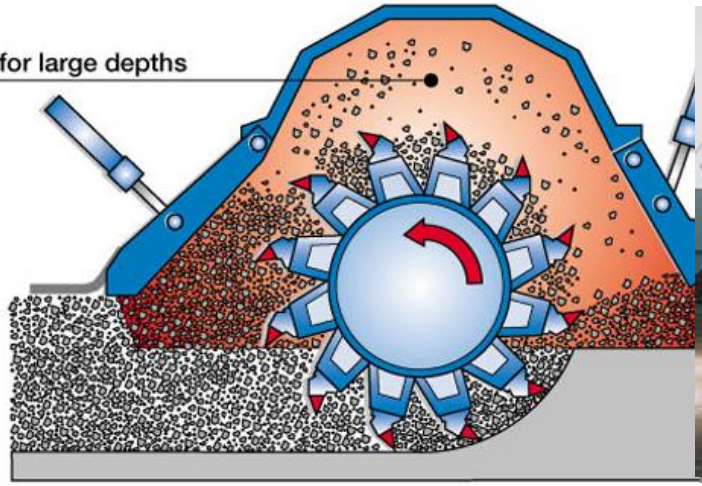
La macchina per miscelare la terra con la calce è chiamata pulvimixer o stabilizzatrice; è dotata di un rotore, che gira in senso opposto all'avanzamento equipaggiato con palette o denti secondo la terra trattata.

La posizione del rotore è regolabile automaticamente in altezza; la profondità di miscelazione normalmente varia tra 20 e 50 cm a seconda delle caratteristiche delle terre e delle indicazioni di progetto.

A parità di potenza disponibile, la velocità di avanzamento e il numero di passate dipendono dal grado di coesione e dall'umidità delle terre lavorate.

Miscelazione





Preparazione e miscelazione

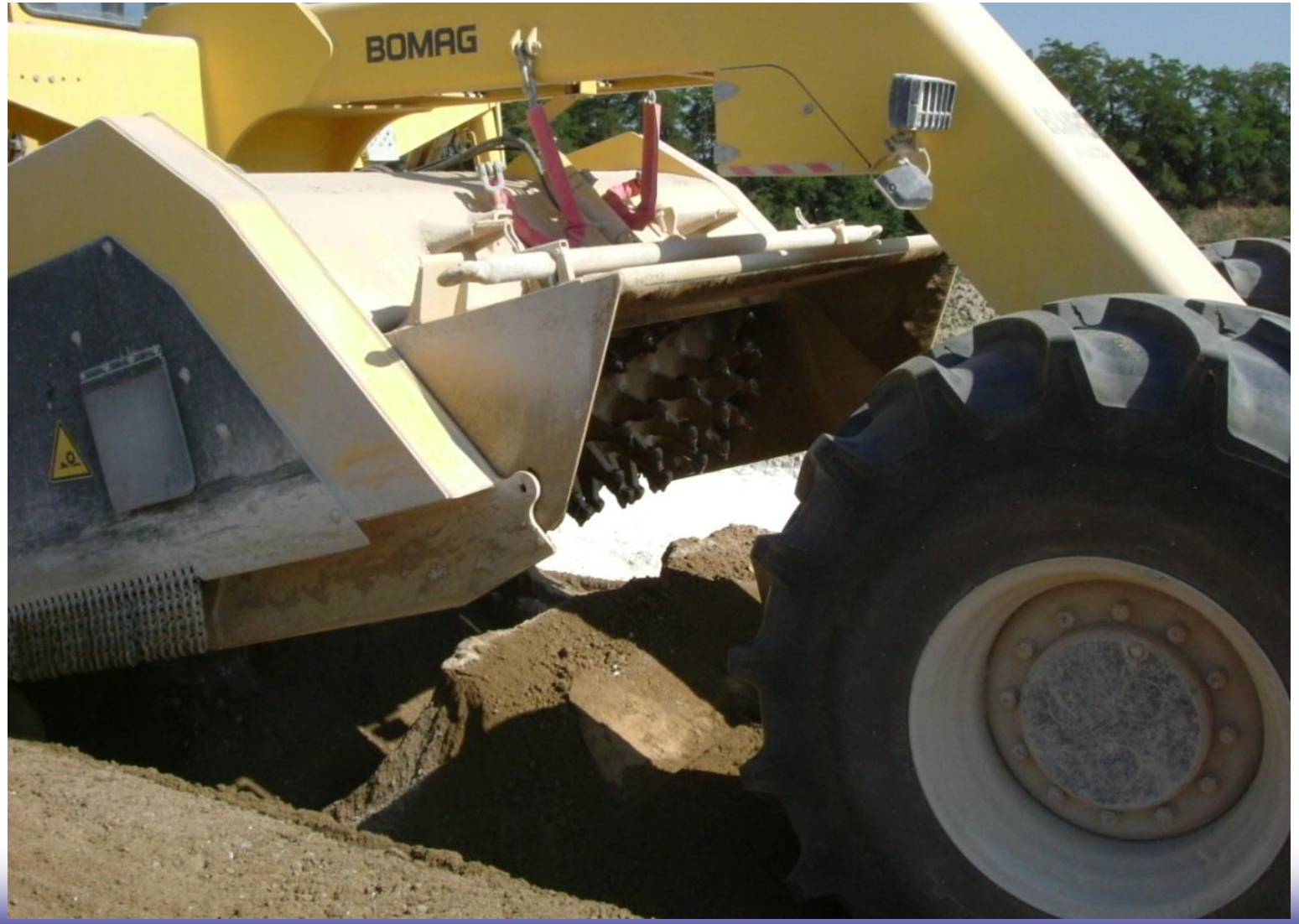
University of Parma

Miscelazione

Miscelazione

Miscelazione

University of Parma



Miscelazione

Miscelazione e Compattazione

Il controllo della miscelazione

University of Parma

Dopo la miscelazione della terra con la calce si devono controllare la granulometria, l'omogeneità di miscelazione e la profondità dello strato lavorato.

La miscela si ritiene idonea quando appare di colore omogeneo e la componente limo-argillosa è interamente passante allo staccio a rete da 25 mm.

La miscelazione deve interessare anche alcuni centimetri dello strato precedentemente realizzato, in modo da assicurare omegeneità nel materiale

Il controllo della miscelazione

University of Parma

Il controllo dell'umidità

University of Parma

La miscela deve essere costipata all'umidità ottima; il Laboratorio perciò verifica l'effettiva umidità dopo la completa idratazione della calce.

Se l'umidità è in difetto è necessario aggiungere acqua fino ad umidità ottimale; allo scopo si utilizza un'autobotte dotata di un adeguato sistema di spruzzatura.

Dopo l'aggiunta si effettuano ulteriori passaggi con la stabilizzatrice per distribuire omogeneamente l'acqua in tutto lo strato lavorato.

Correzione dell'umidità

University of Parma

Compattazione

Compattazione

Compattazione

Compattazione

Compattazione

University of Parma

Compattazione

Controllo portanza

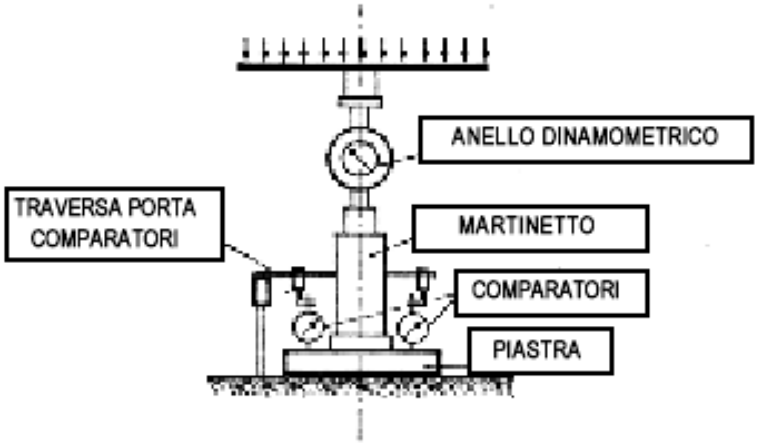
University of Parma

Modulo di deformazione

(C.N.R. B.U. n. 146 14/12/92)

Md [N/mm^2]

$$Md = \frac{\Delta p}{\Delta s} D$$



Controllo portanza

Ogni 1000 m^2 di terreno trattato e per ogni tratto di miscela omogenea posata si esegue una prova di carico su piastra a doppio ciclo con misura del modulo di deformazione (Md) che, completata al primo ciclo di carico, deve essere non inferiore a:

- 20 N/mm^2 per gli strati costituenti il corpo del rilevato, con esclusione degli ultimi 30 cm, nel ciclo di carico compreso tra 0.05 N/mm^2 e 0.15 N/mm^2.
- 50 N/mm^2 per l'ultimo strato del corpo del rilevato nel ciclo di N/mm^2 e 0.25 N/mm^2.

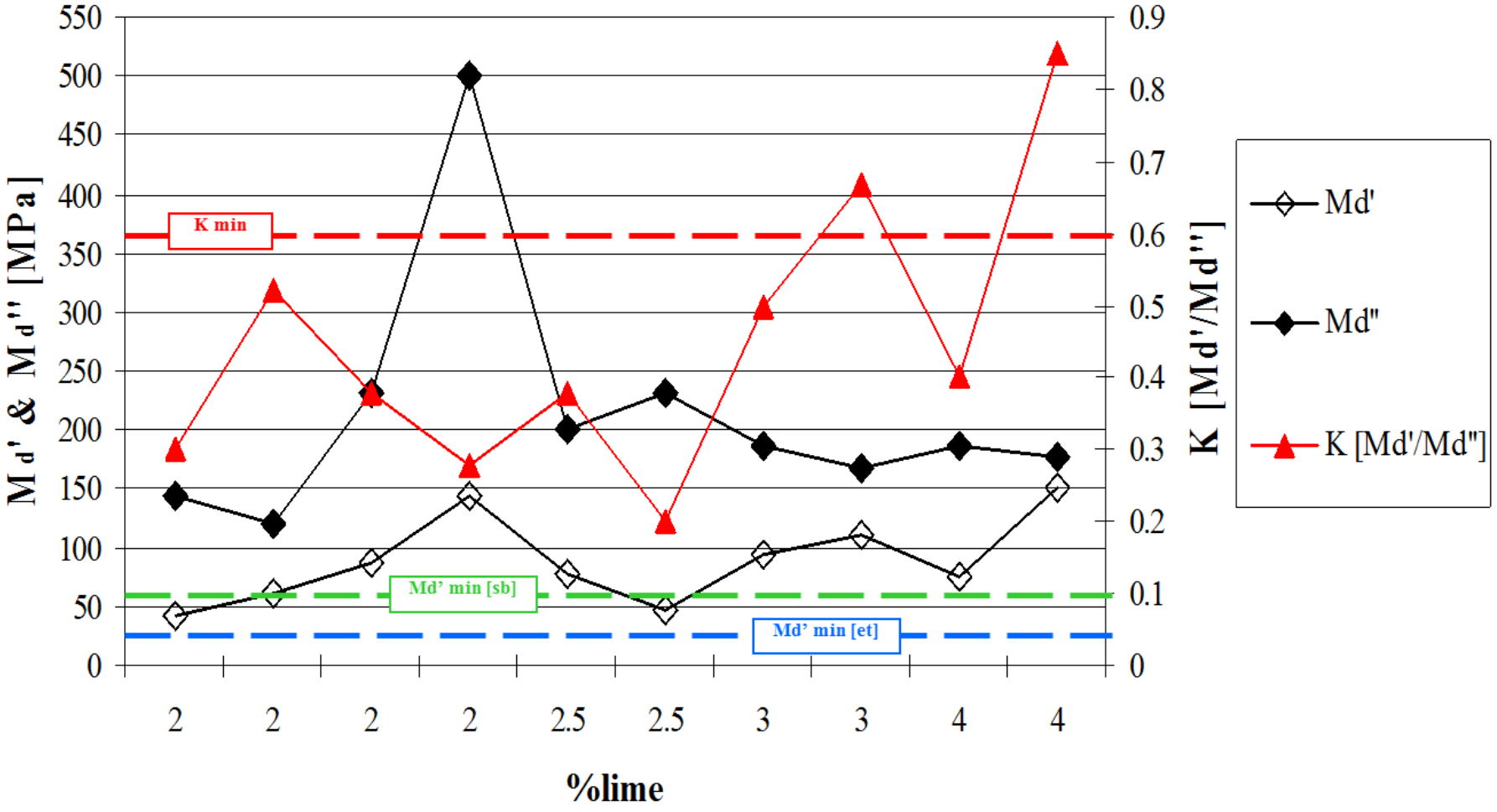
Inoltre in entrambi i casi il rapporto tra i valori dei moduli di deformazione misurati al primo ed al secondo ciclo (Md/M'd) deve essere non inferiore a 0.6.

Controllo portanza

%lime	*layer*	*minimum required M_d' [MPa] @ K*	*M_d' [MPa]*	*M_d" [MPa]*	*K [M_d'/M_d"]*
2	et	50 @ 0.6	43.48	142.86	0.30
2	et	50 @ 0.6	62.50	120.0	0.52
2	sb	80 @ 0.6	88.24	230.77	0.38
2	sb	80 @ 0.6	142.86	500.00	0.28
2.5	et	50 @ 0.6	76.92	200.00	0.38
2.5	et	50 @ 0.6	47.62	230.77	0.20
3	et	50 @ 0.6	93.80	187.50	0.50
3	et	50 @ 0.6	111.10	166.70	0.67
4	et	50 @ 0.6	75.00	187.50	0.40
4	et	50 @ 0.6	150.00	176.50	0.85
et: embankment top – sb: sub-base layer					

Controllo portanza

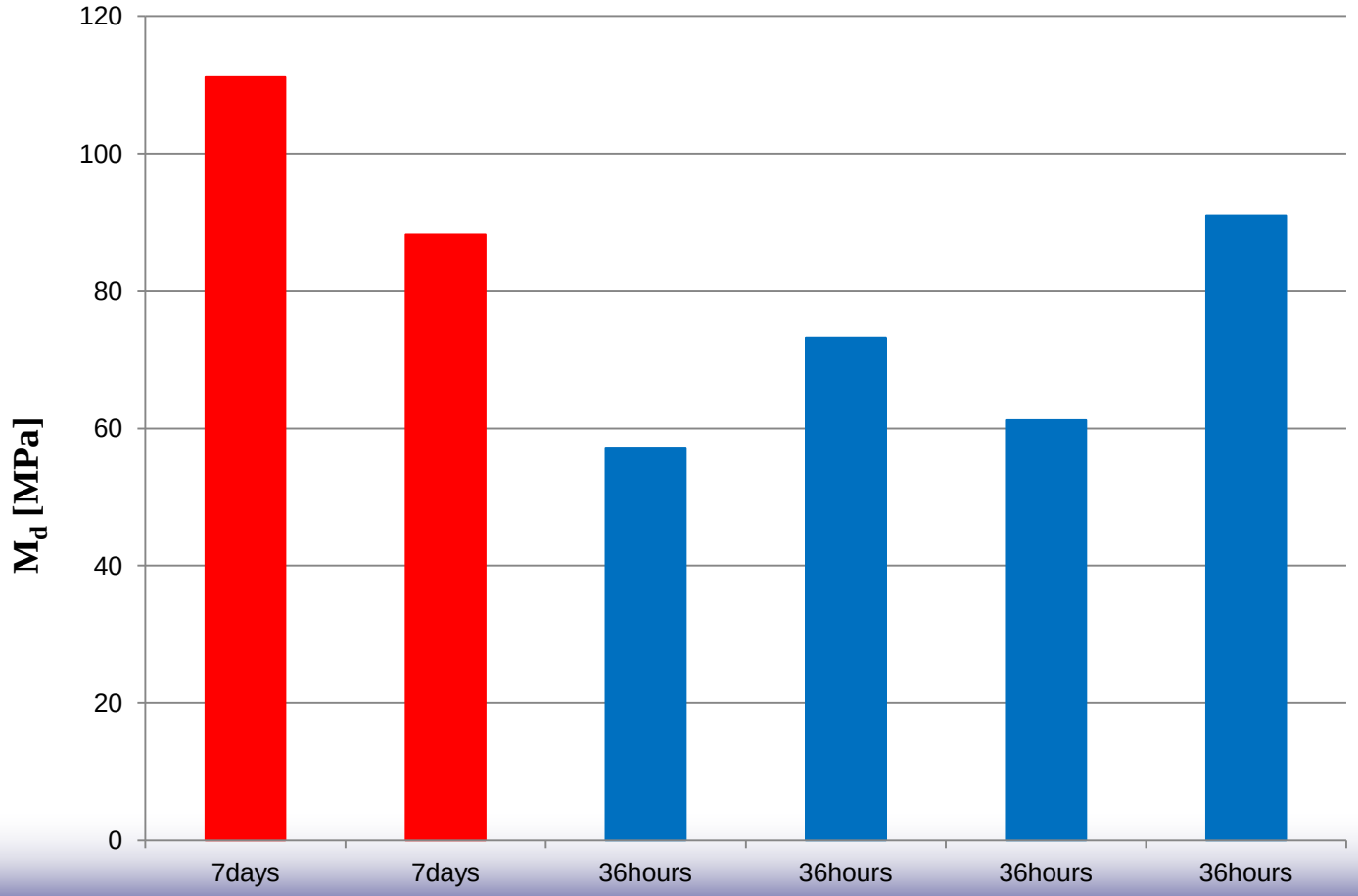
University of Parma



Controllo portanza

University of Parma

Ogni 250-300 m e ogni metro di spessore]



Falling Weight Deflectometer

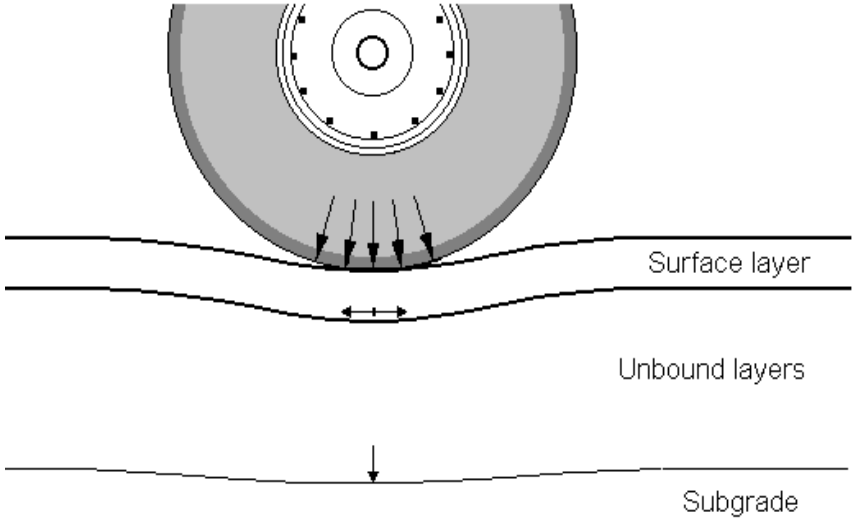
University of Parma

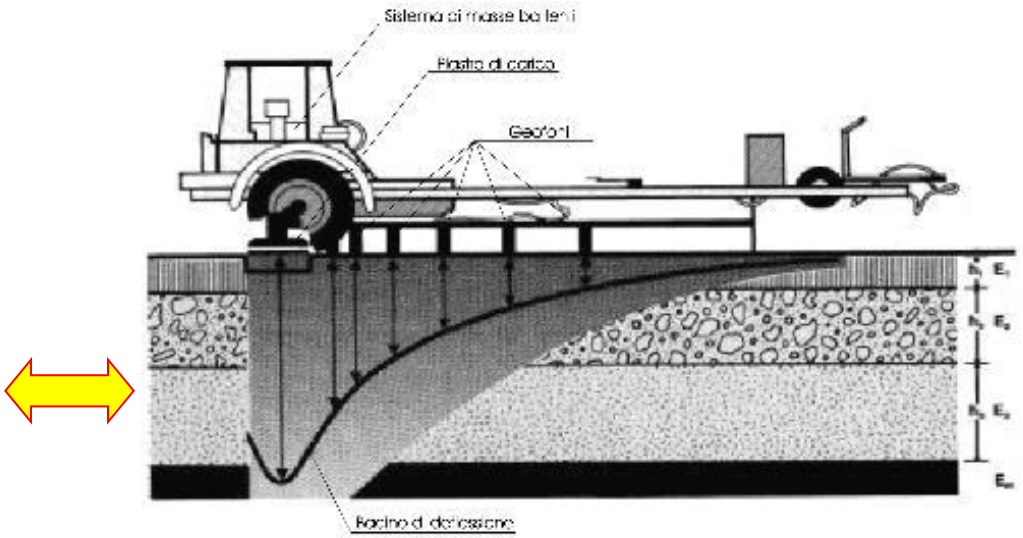
Permette di condurre indagini non distruttive sulla pavimentazione stradale mediante l'analisi di un bacino di deflessione indotto dall'applicazione di un carico superficiale.

Falling Weight Deflectometer

University of Parma

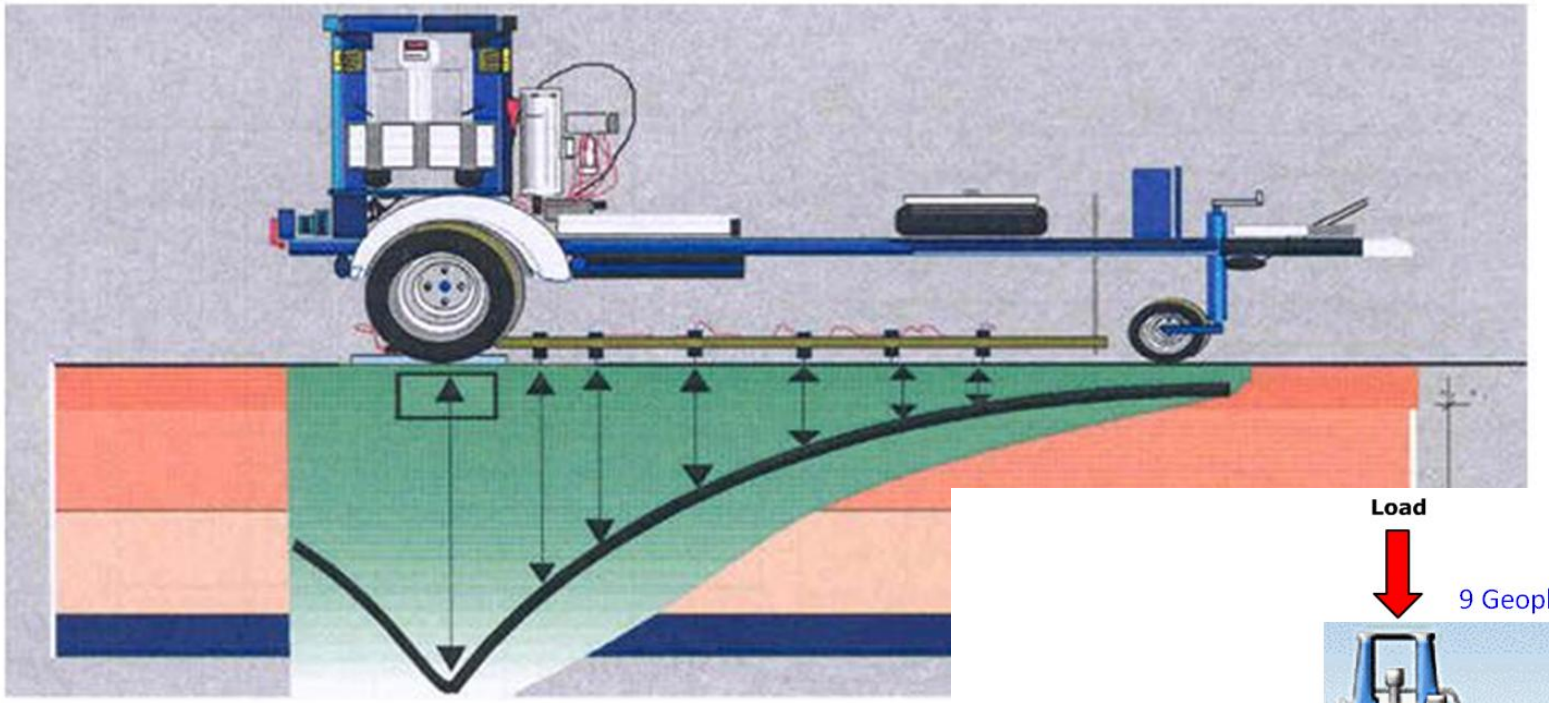
Il FWD è in grado di applicare un carico dinamico di entità simile a quello trasmesso alla pavimentazione dalla ruota di un veicolo commerciale pesante alla velocità di 40-60 Km/h.

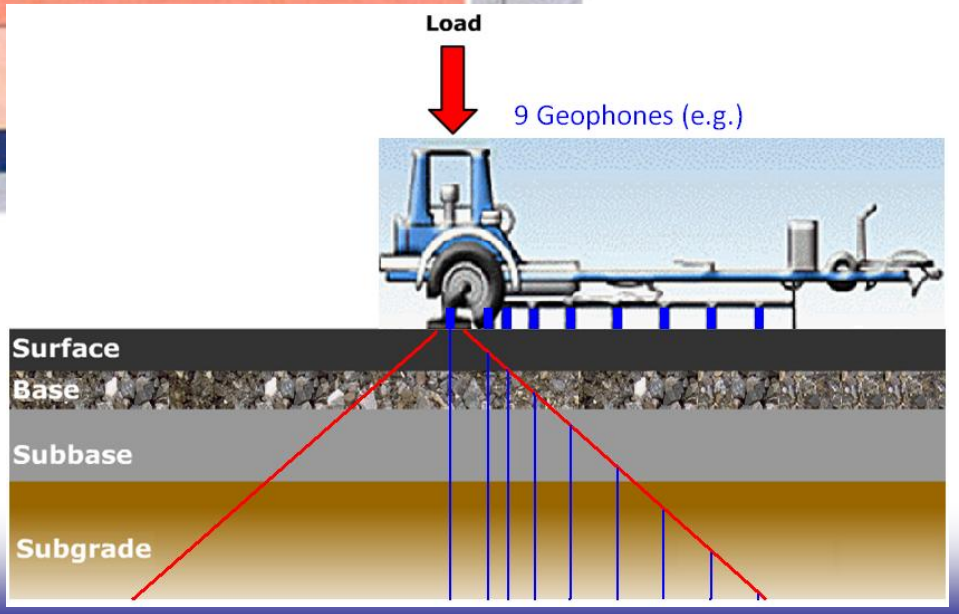




Falling Weight Deflectometer

University of Parma





Light Falling Weight Deflectometer

University of Parma

$$E_{LFWD} = \frac{f \cdot \left(1 - \nu^2\right) \cdot \sigma \cdot a}{\delta}$$

Modulo elastico dinamico del semispazio equivalente (Equazione di Boussinesq)

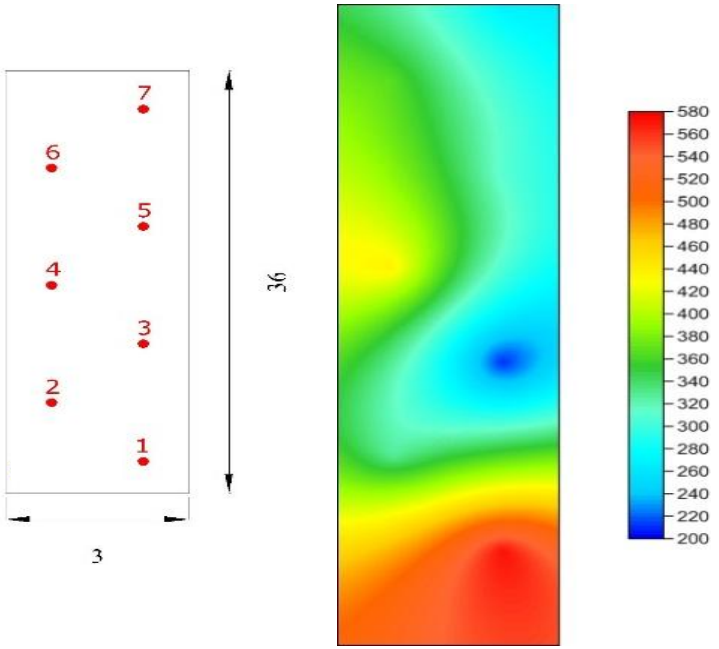
f = coefficiente che dipende dal tipo di distribuzione delle tensioni al disotto della piastra di carico

Uniforme	f=2
Piastra rigida	f=p/2
Parabolica (granulare)	f=8/3
Parabolica (coesivo)	f=4/3

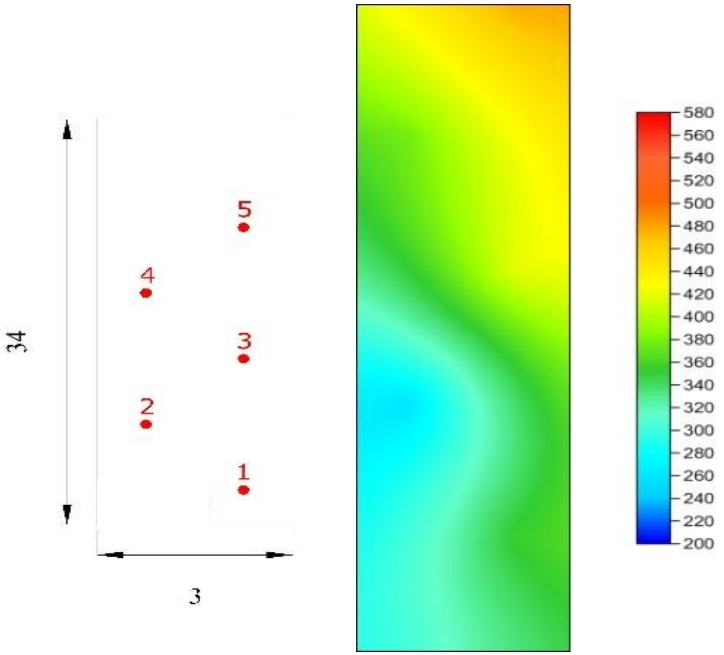
s = tensione trasmessa dalla piastra
a = raggio della piastra
d = deflessione al centro della piastra

Light Falling Weight Deflectometer

University of Parma



Media = 376 MPa
Stand. Dev = 125
CoV = 33%



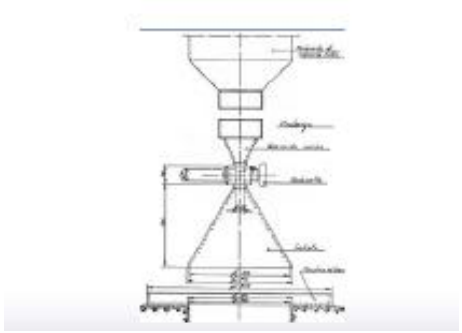
Media = 365 MPa
Stand. Dev = 78
CoV = 22%

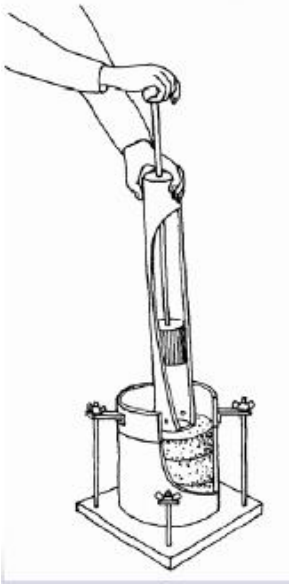
Controllo densità

University of Parma

Controllo della compattazione

Prova Proctor e 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.





Grazie per l'attenzione!
Domande?