

Corso di aggiornamento professionale Ordine dei Geologi del Lazio
Compattazione e miscelazione: dalle nuove normative italiane ai processi di mixing

30 Aprile 2024



La stabilizzazione dei terreni a calce/cemento

Applicazioni, realizzazione e controllo

Ing. Ignazio Paolo Marzano

AGiS Ingegneria

Cenni sulla compattazione dei terreni

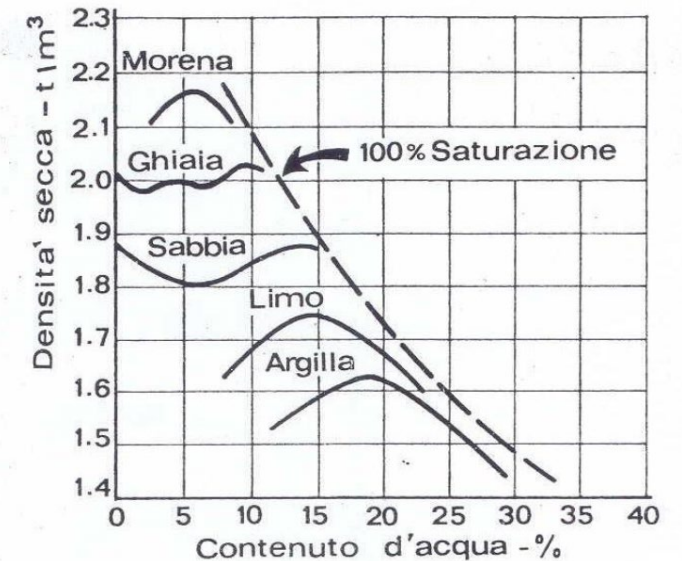
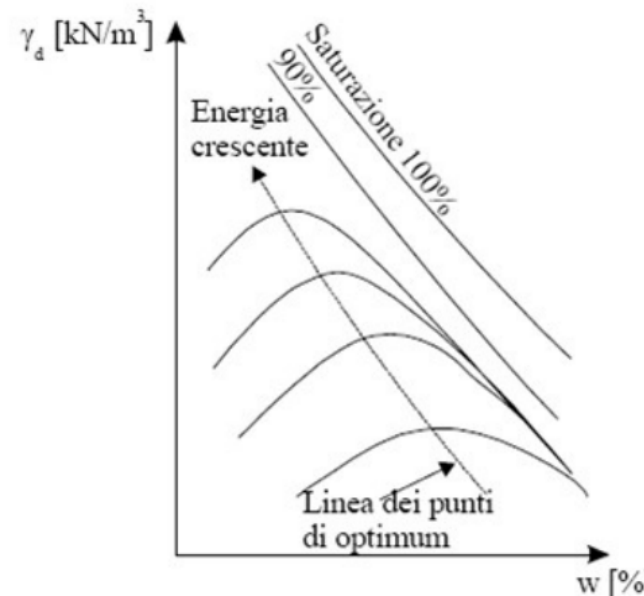
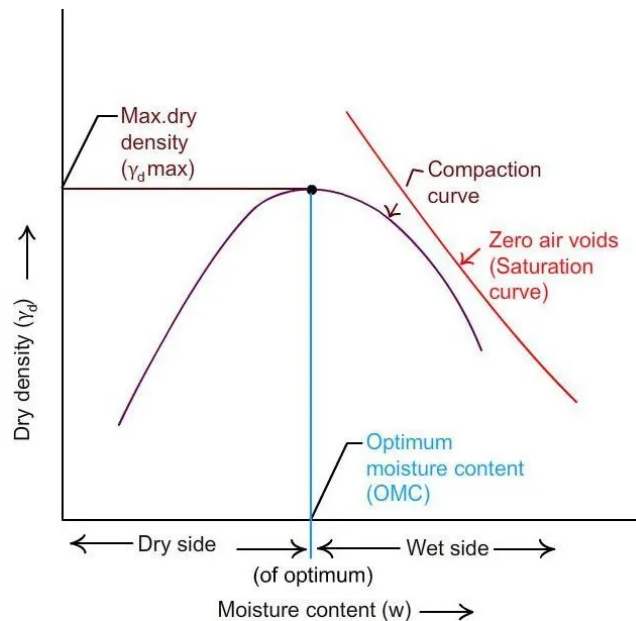
- Generalità
- Classificazione delle terre
- Compattazione (*tipologie, profondità di compattazione, scelta del rullo*)

Cenni sulla compattazione dei terreni

L'obiettivo della compattazione e il miglioramento delle caratteristiche fisiche e meccaniche di un terreno

Il valore di densità secca ottenibile a fine costipamento è funzione principalmente di tre grandezze:

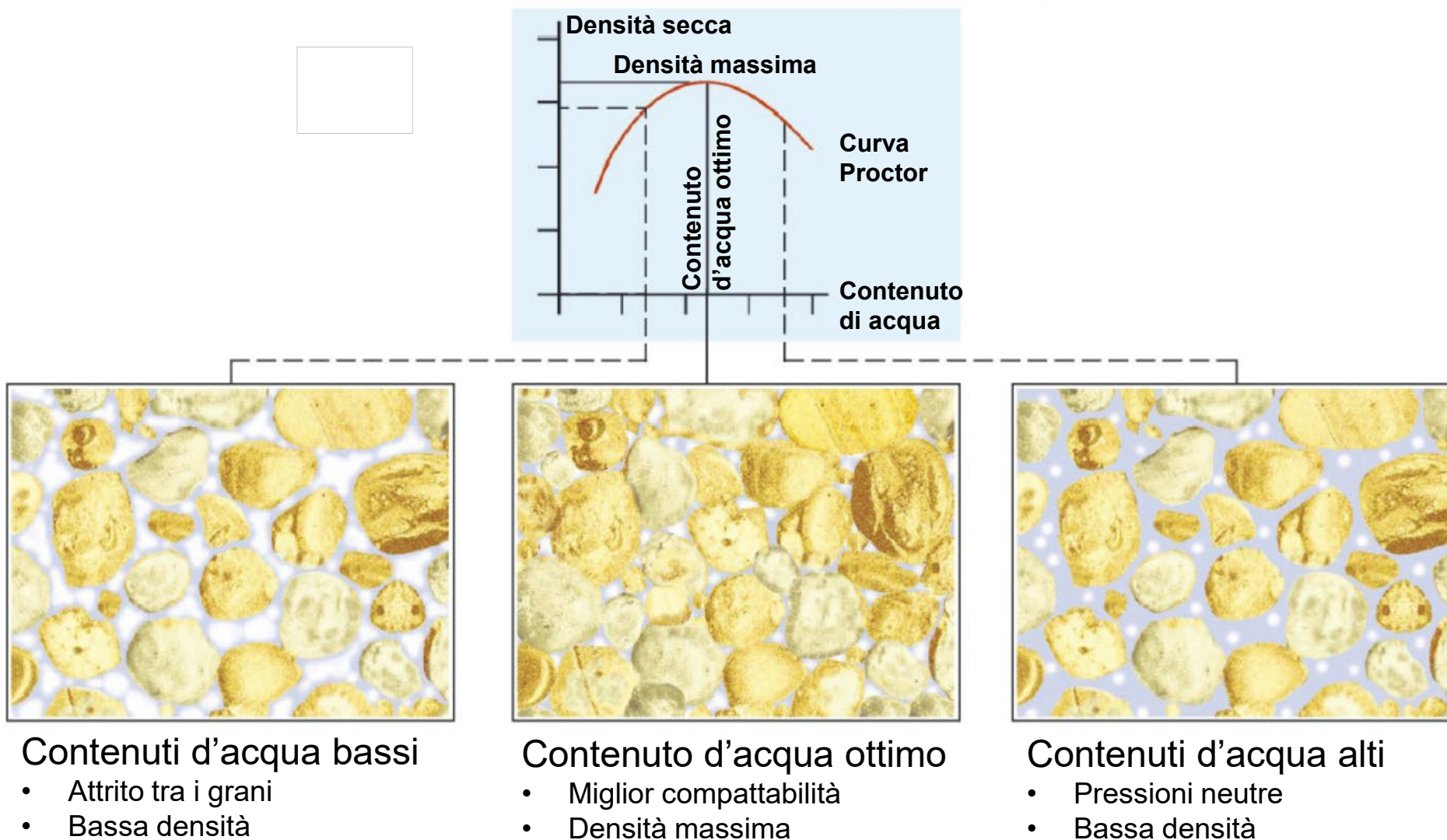
- Tipologia di terreno (*assortimento granulometrico, composizione mineralogica, storia tensionale ecc...*)
- Contenuto di acqua (w)
- Energia di costipamento



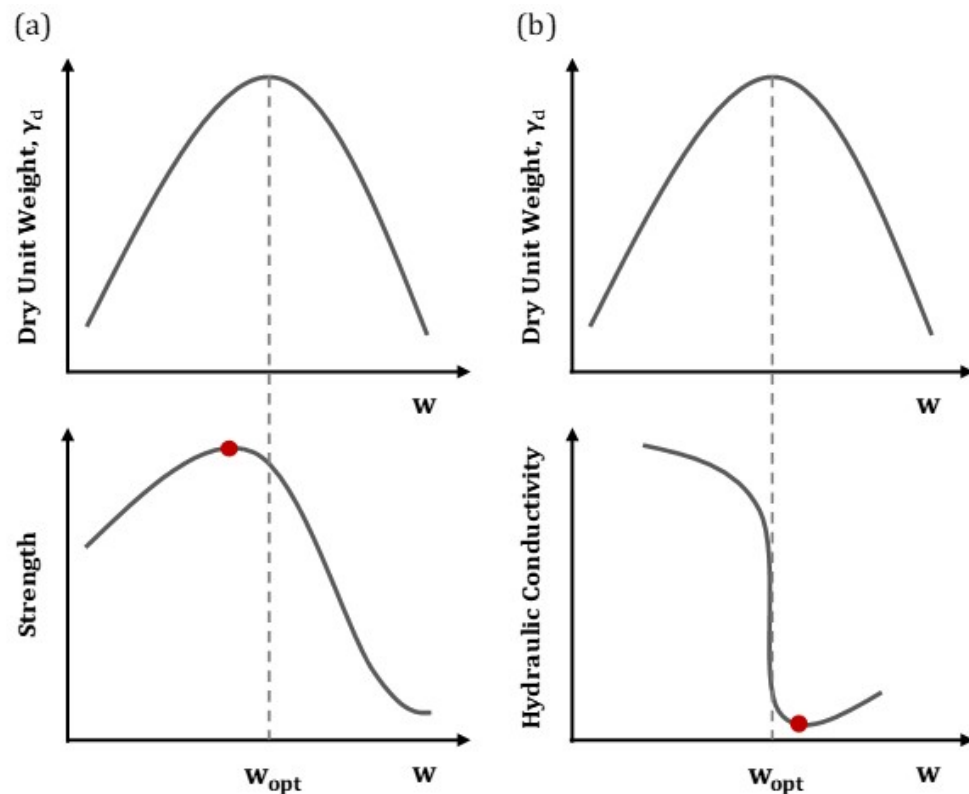
Un contenuto del 10%-15% di terreni a grana fine e finissima è sufficiente a modificare il comportamento dei terreni granulari

Cenni sulla compattazione dei terreni

Influenza del contenuto di acqua sulla compattabilità



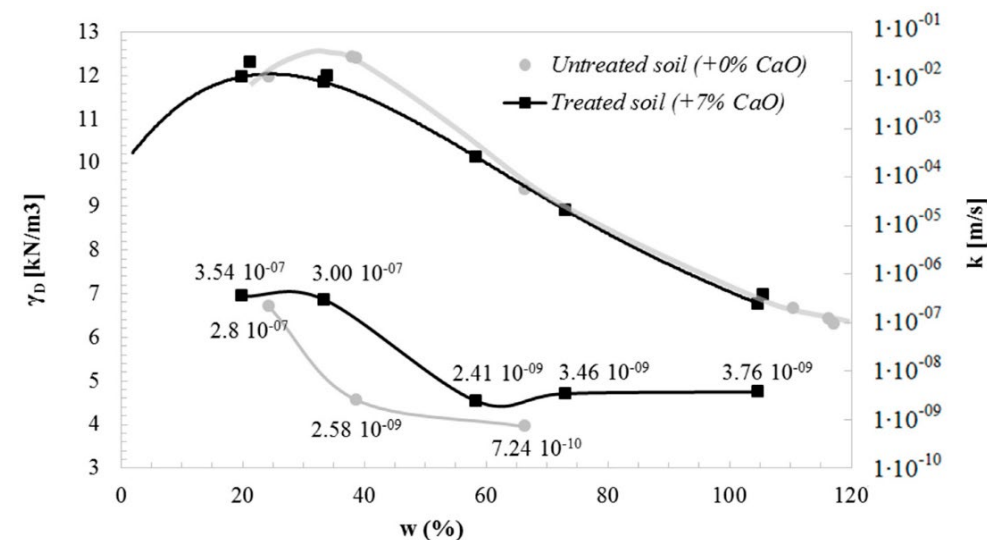
Cenni sulla compattazione dei terreni



<https://www.geoengineer.org/education/laboratory-testing/compaction-test>

Curve teoriche

Dati sperimentali da Di Sante et al. 2020



Scelta in funzione dell'applicazione
(e.g. argine o rilevato stradale)

Cenni sulla compattazione dei terreni

Impiegabilità delle terre per le opere ferroviarie

La UNI 11531-1
in sostituzione della
CNR-UNI 10006

Classificazione generale	Terre ghiaio-sabbioso Frazione passante al setaccio 0,063 mm ≤ 35%							Terre limo-argillose Frazione passante al setaccio 0,063 mm > 35%				
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
Gruppo	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7	
Sottogruppo	A1-a	A1-b	A3	A2-4	A2-5	A2-6	A2-7	A4	A5	A6	A7-5	A7-6
Frazione passante al setaccio 2 mm	≤50	-	>50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,4 mm	≤30	≤50	>50	-	-	-	-	-	-	-	-	-
0,063 mm	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	>35	>35	>35	>35	>35
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 mm												
LL (Limite liquido)	-	-	-	≤40	>40	≤40	>40	≤40	>40	≤40	>40	>40
IP (Indice di plasticità)	≤6	≤6	N.P.	≤10	≤10	>10	>10	≤10	>10	>10	IP ≤ LL-30	IP > LL-30

Da UNI 11531

Senza limitazioni
Possibili anche strati da
50 cm per i terreni dei
gruppi A1 e A2-4



Solo se con coefficiente
disuniformità > 7 quale
rapporto tra i passanti ai
setacci 0,4 mm e 0,063
mm.

Solo dopo studi
specifici, che
dimostrino
l'insensibilità all'acqua

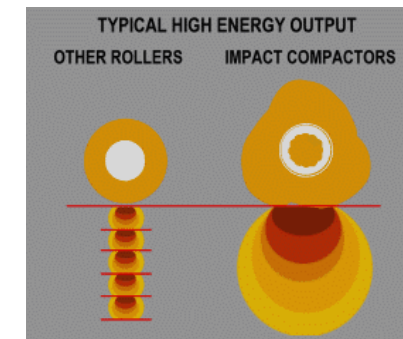
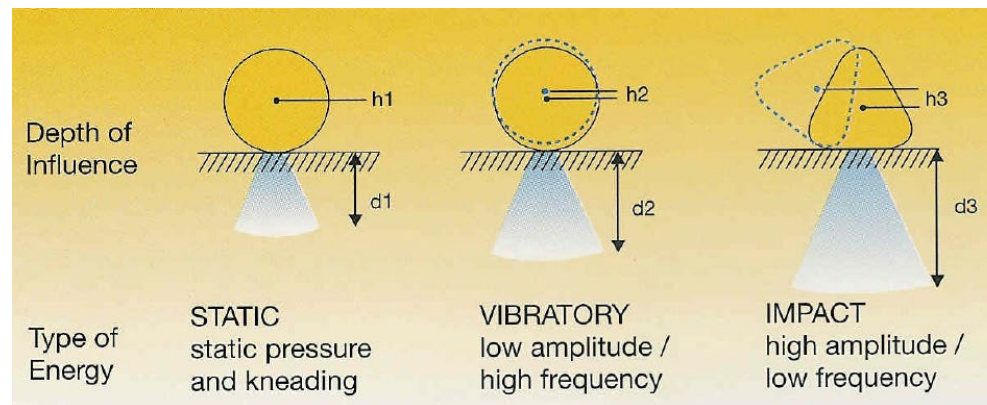
Solo se proveniente
da scavi
Altrimenti stabilizzato
a calce se $I_p > 5$

Solo se in assenza di
materiali altri gruppi
e stabilizzati a calce

Cenni sulla compattazione dei terreni

Rulli compattatori

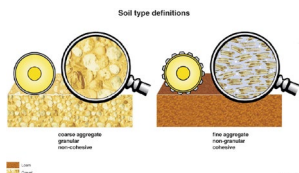
Scelti in funzione della natura dei materiali da mettere in opera/compattare



Liscio



terre granulari (A1, A2 e A3)



Rulli circolari 0,3 - 0,5m

Piede di montone



terre a grana fine «coerenti»

Gommato



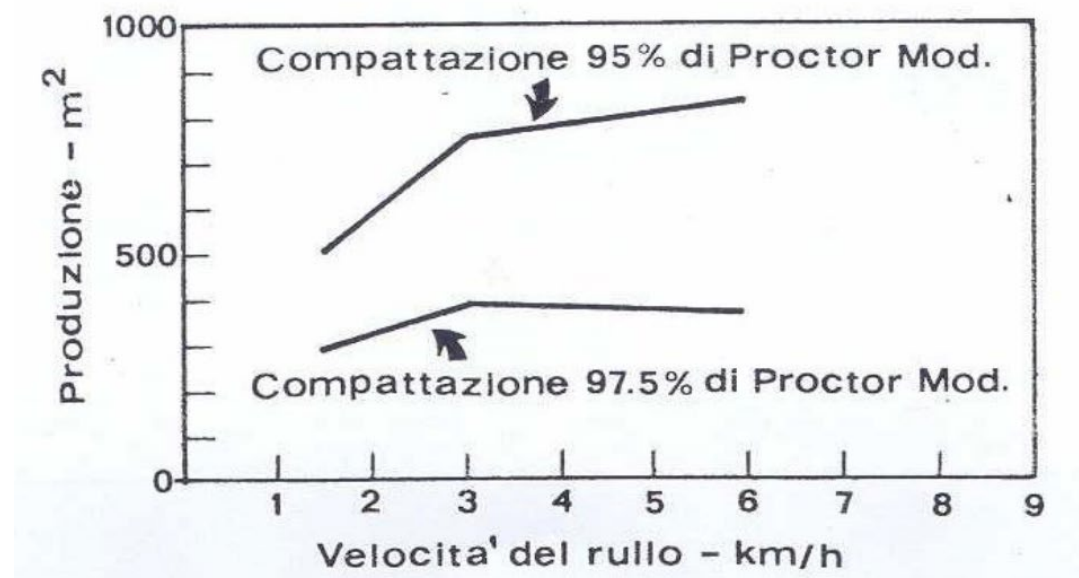
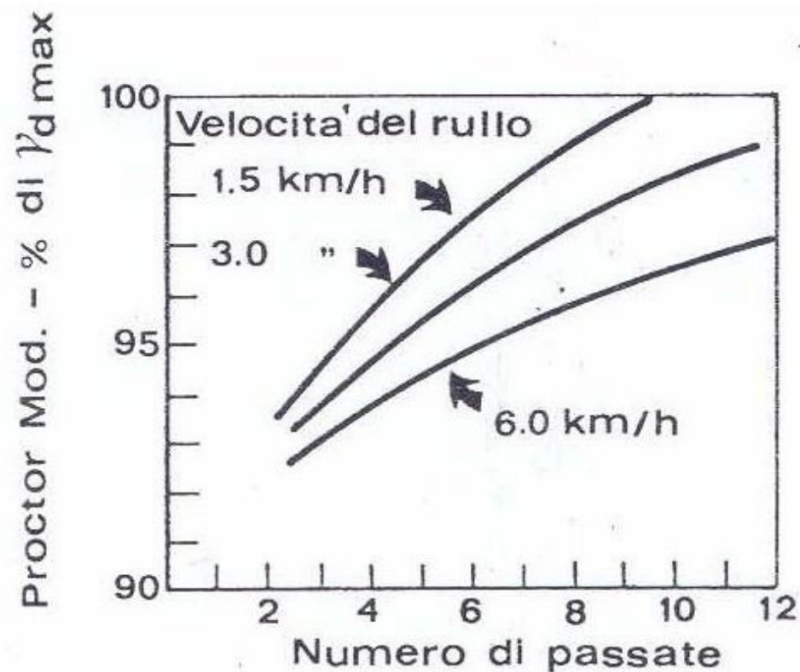
Poligonale



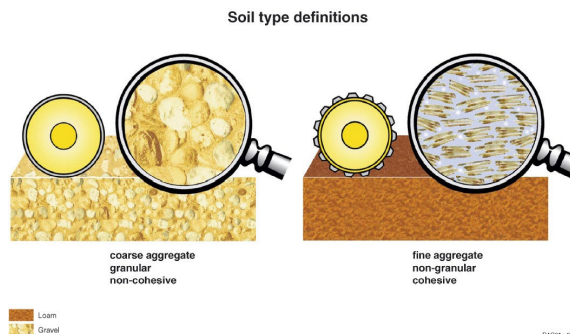
Rulli poligonali fino a 2,0 - 4,0 m

Cenni sulla compattazione dei terreni

Rulli compattatori: non solo tipologie ma anche modalità di impiego



4-8 passate di rullo liscio vibrante da 10-12 tonn



6-10 passate di rullo a piede di montone non vibrante da 10-12 tonn

Il trattamento dei terreni con leganti idraulici

- La tecnica
- I materiali
- Il progetto delle miscele
- Preparazione del terreno
- Campo prove
- Compattazione
- Controlli periodici
- Caso di studio

Il trattamento dei terreni con leganti idraulici

Consiste nella miscelazione del terreno con calce e/o cemento, in modo da modificarne le caratteristiche di lavorabilità e di resistenza meccanica

Consente l'impiego di materiali altrimenti non idonei per la costruzione di opere in terra (rilevati, terre rinforzate ecc...), stabilizzazione di sottofondi stradali, consolidamento materiali di colmata ecc..

In relazione alla quantità di legante aggiunta:

Miglioramento (o bonifica)

con impiego di minori % di legante

- diminuzione della plasticità
- diminuzione w_n
- aumento lavorabilità
- aumento IPI (indice di portanza immediata)
- adeguato costipamento



Stabilizzazione

con impiego di maggiori % di legante

- Indurimento
- aumento della resistenza nel tempo
- caratteristiche durevoli




Il trattamento dei terreni con leganti idraulici

Stabilizzazione a Calce

Bollettino Ufficiale CNR N.36 del 1973

EN 14227-11:2006 **Miscele legate con leganti idraulici**
Specifiche
Parte 11: Terra trattata con calce

Ritirata senza sostituzione (data ritiro: 2015)

 Caratteristica	Prescrizione
Fuso	B.U. CNR 36
Indice di plasticità	10 < IP < 50
Solfati	< 1%
Sostanza organica	< 2%
Diametro max	< 50 mm
Blu di Metilene	> 200
Consumo iniziale calce	> 1,5%

...preferibilmente...

- D95 < 63mm
- %P 63µm > 12%
- Indice di plasticità > 5



TERRE IDONEE AL TRATTAMENTO CON LA CALCE													
Classificazione Generale	Terre ghiaio - sabbiose							Terre limo - argillose					
	Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 ≤ 35%							Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 > 35%					
	A1		A3	A2				A4	A5	A6	A7		
Gruppo	A1a	A1b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7				A7-5	A7-6	
Analisi granulometrica frazione passante al setaccio													
2 UNI 2332%	≤80												
0,4 UNI 2332%	≤30	≤80	≥80										
0,075 UNI 2332%	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	>35	>35	>35	>35	>35	
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 UNI 2332													
Limite liquido	0			≤40	>40	≤40	>40	≤40	>40	≤40	≤40	≤40	
Indice di plasticità	≤6		N.P.	≤10	≤10 MAX	>10	>10	≤10	≤10	>10	>10 (IP>LL30)	>10 (IP>LL30)	
Indice di gruppo	0		0	0		≤4		≤8	≤12	≤18	≤20		
Tipi usuali di materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia e breccia, sabbione, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fine	Ghiaia e sabbia limosa argillosa					Limi poco compressibili	Limi fort. Compressibili	Argille poco compressibili	Argille fort. Compressibili med. Plastiche	Argille fort. Compressibili fort. Plastiche

Stabilizzazione a Calce

Capitolato RFI

LIMITI DI ACCETTAZIONE DEL TERRENO NATURALE			
Test di Laboratorio	Norma di riferimento	Requisito	Limiti di accettabilità
Analisi granulometrica	CNR B.U n. 36 UNI EN 933-1 UNI CEN ISO/TS 17892-4	Granulometria	par. 2.1 della norma CNR B.U. n.36 ⁽¹⁾
Limiti di Atterberg (LL-LP)	UNI CEN ISO/TS 17892-12	Indice di plasticità IP	>10 ⁽¹⁾
Contenuto in sostanze organiche	ASTM D 2974 - C	Sostanze organiche	< 2% ⁽²⁾
Contenuto in solfati	UNI EN 1744-1	Solfati totali	< 0,25% ⁽³⁾

⁽¹⁾ Saranno ammesse granulometrie diverse da quelle interamente comprese nel fuso e un valore minore della plasticità a condizione che si dimostri l'idoneità della terra ad essere trattata, attraverso lo studio delle miscele di laboratorio e un campo prova preventivamente approvato da Ferrovie. In ogni caso il diametro massimo degli elementi non dovrà essere maggiore della metà dello spessore finito di ciascuno degli strati di terra trattata per la realizzazione dei rilevati e l'indice di plasticità dovrà essere IP>5

⁽²⁾ Questo valore può essere aumentato fino al 4%, nel caso di impiego del trattamento per il piano di posa del rilevato, a condizione che siano soddisfatti i valori delle prove sul prodotto finale riportati al capitolo II.5

⁽³⁾ Questo valore può essere aumentato fino a raggiungere l'1%, qualora lo studio di laboratorio della miscela sia stato ritenuto idoneo da Ferrovie

B.U. CNR 36

STABILIZZAZIONE DELLE TERRE CON CALCE

2.1 - Terra

Una terra, affinché risulti adatta alla stabilizzazione a calce, deve essere di tipo limo-argilloso ed avere indice di plasticità normalmente superiore a 10 (tipo A₆ ed A₇ di cui alla norma CNR-UNI 10006).

Possono essere stabilizzate a calce anche terre ghiaio-argillose (tipo A₂₋₆ e A₂₋₇) qualora presentino una frazione di passante al setaccio 0,4 UNI non inferiore al 35 %.

La loro curva granulometrica deve rientrare nel fuso riportato in fig. 1: il diametro massimo degli elementi viene stabilito in funzione dell'impiego della miscela.

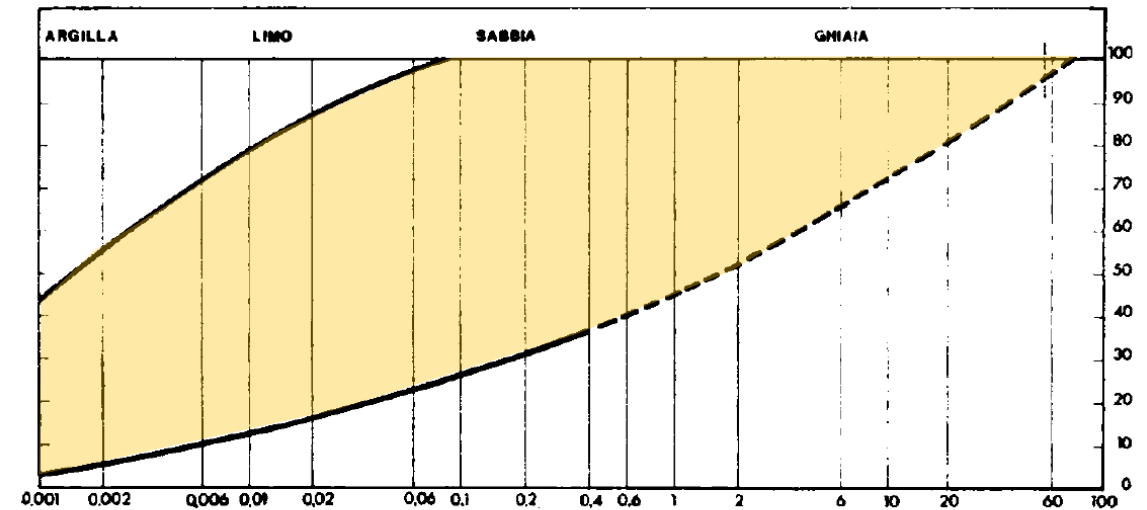


Fig. 1 - Fuso granulometrico delle terre per la stabilizzazione con calce

Il trattamento dei terreni con leganti idraulici

Stabilizzazione a Cemento

EN 14227-10:2006 **Miscele legate con leganti idraulici Specifiche**
Parte 10: Terra trattata con cemento

UNI EN 14227-15:2015

Miscele legate con leganti idraulici - Specifiche - Parte 15: Terreno stabilizzato con legante idraulico

Terreni sabbiosi con %P a 65mm non inferiore al 95%



Consigliata se %P al setaccio 200 ASTM < 10% - 15%

Caratteristica	Prescrizione
Passante 0,075mm	≤ 50%
Indice di plasticità	<15
Solfati	<1%
Sostanza organica	<2%
Diametro max	< 50 mm
Cemento	Portland 32,5

TERRE IDONEE AL TRATTAMENTO A CEMENTO

Classificazione Generale	Terre ghiaia - sabbiose							Terre limo - argillose				
	Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 ≤ 35%							Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 > 35%				
	A1		A3	A2		A4	A5	A6	A7			
Gruppo	A1a	A1b		A2-4	A2-5	A2-6	A2-7			A6	A7-5	A7-6
Analisi granulometrica frazione passante al setaccio												
2 UNI 2332%	≤80											
0,4 UNI 2332%	≤30	≤80	≥80									
0,075 UNI 2332%	≤15	≤25	≤10	≤35	≤35	≤35	≤35	>35	>35	>35	>35	>35
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 UNI 2332												
Limite liquido	0			≤40	>40	≤40	>40	≤40	>40	≤40	≤40	≤40
Indice di plasticità	≤6		N.P.	≤10	≤10 MAX	>10	>10	≤10	≤10	>10	>10 (IP>LL30)	>10 (IP>LL30)
Indice di gruppo	0		0	0		≤4		≤8	≤12	≤18	≤20	≤20
Tipi usuali di materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia e breccia, sabbione, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fine	Ghiaia e sabbia limosa argillosa				Limi poco compressibili	Limi fort. Compressibili	Argille poco compressibili	Argille fort. Compressibili med. Plastiche	Argille fort. Compressibili Plastiche

Principalmente adoperato per aumentare le capacità portanti di fondazioni stradali

Il trattamento dei terreni con leganti idraulici

Stabilizzazione a Calce e Cemento

Applicabile in particolari terreni con

- Indice di plasticità IP al di fuori dei range ottimali di stabilizzazione solo a calce ($IP < 10$) o solo a cemento ($IP > 15$) sono comunque da escludere terreni con IP troppo elevati
- Granulometria intermedia a quella ottima per calce o cemento

Il terreno viene prima inertizzato aggiungendo la calce e successivamente trattato con il cemento in modo da creare un legante pozzolanico

Questo trattamento si può effettuare anche per ottenere capacità di carico superiori a quelle ottenibili con il solo trattamento a calce o con il solo trattamento a cemento

TERRE IDONEE AL TRATTAMENTO BINARIO (CALCE E CEMENTO)											
Classificazione Generale	Terre ghiaio - sabbiose						Terre limo - argillose				
	Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 \leq 35%			Frazione passante al setaccio 0,075 UNI 2332 $>$ 35%							
	A1	A3	A2	A4	A5	A6	A7				
Gruppo	A1a	A1b	A2-4	A2-5	A2-6	A2-7	A4	A5	A6	A7-5	A7-6
Sottogruppo											
Analisi granulometrica frazione passante al setaccio											
2 UNI 2332%	≤ 80										
0,4 UNI 2332%	≤ 30	≤ 80	≥ 80								
0,075 UNI 2332%	≤ 15	≤ 25	≤ 10	≤ 35	≤ 35	≤ 35	≤ 35	> 35	> 35	> 35	> 35
Caratteristiche della frazione passante al setaccio 0,4 UNI 2332											
Limite liquido	0		≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	> 40	≤ 40	≤ 40	≤ 40
Indice di plasticità	≤ 6		N.P.	≤ 10	≤ 10 MAX	> 10	> 10	≤ 10	≤ 10	> 10	> 10
Indice di gruppo	0		0	0	≤ 4	≤ 8	≤ 12	≤ 18	≤ 20	≤ 20	≤ 20
Tipi usuali di materiali caratteristici costituenti il gruppo	Ghiaia e breccia, sabbione, sabbia grossa, pomice, scorie vulcaniche, pozzolane		Sabbia fine	Ghiaia e sabbia limosa argillosa			Limi poco compressibili	Limi fort. Compressibili	Argille poco compressibili	Argille fort. Compressibili med. Plastiche	Argille fort. Compressibili Plastiche

Il trattamento dei terreni con calce

Meccanismi di reazione a breve termine

ESSICCAZIONE dovuta al FISSAGGIO CHIMICO dell'acqua ed alla EVAPORAZIONE conseguente a un innalzamento della temperatura generato da una reazione fortemente esotermica



dopo 2h: $\Delta w\%$ = 1 o 1.5% per ogni 1% di CaO aggiunto.

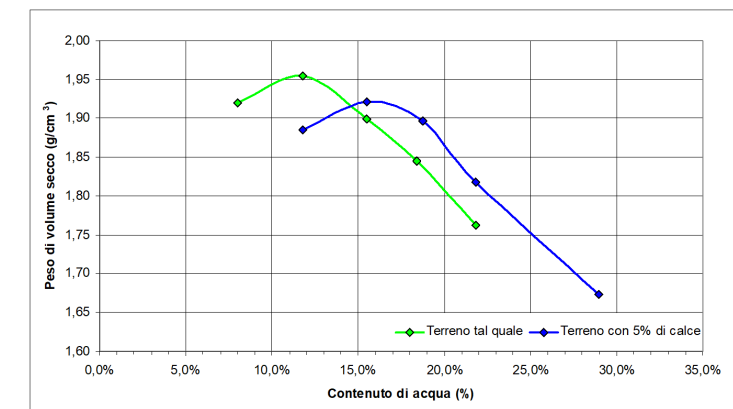
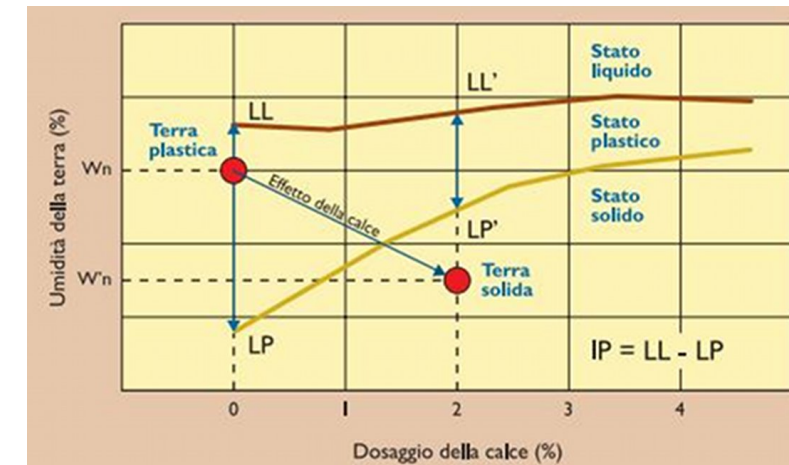
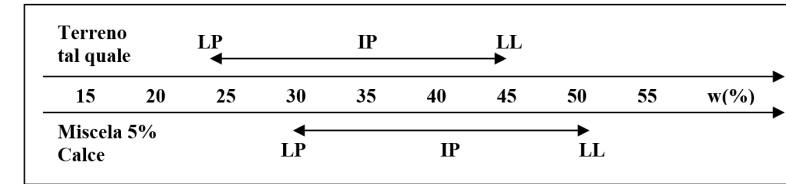
FLOCCULAZIONE dovuta allo scambio di ioni liberi in soluzione Ca^{++} con i cationi Na^+ , K^+ , ecc., che consente la formazione nelle primissime ore di legami tra le particelle disperse di argilla che vengono in tal modo agglomerate AGEVOLANDO LE OPERAZIONI DI MISCELAZIONE E COMPATTAZIONE.



Il trattamento dei terreni con calce

Effetti sulle miscele a breve termine

- **Limiti di Atterberg**; aumento del limite plastico W_p e conseguente riduzione di IP;
- modifica della **distribuzione granulometrica** a causa della flocculazione;
- **costipamento**: la curva Proctor risulta appiattita e l'optimum di densità secca si verifica con contenuto di acqua superiore; si rileva una riduzione generale delle densità per effetto dell'aumento dell'indice dei vuoti;
- riduzione del **rigonfiamento** e del **ritiro** a causa sia della diminuzione di affinità all'acqua dei materiali trattati, sia della formazione di legami stabili che si oppongono ai cambiamenti di volume;
- l'indice **CBR** può aumentare da 4 a 10 volte già dopo 2h.



Il trattamento dei terreni con calce

Meccanismi di reazione a lungo termine

- le reazioni tipiche tra calce e terreni argillosi, qualitativamente sono rappresentati da

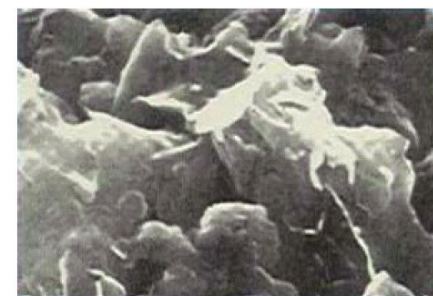


in cui gli indici x,y,z e x',y',z' variano a seconda che l'argilla sia una montmorillonite (molto reattiva), una caolinite (mediamente reattiva) oppure una illite (poco reattiva e difficilmente attaccabile)

- Principali parametri che influenzano l'azione della calce

- Superficie Specifica** (elevata),
- Carbonatazione (evitare l'esposizione all'aria),
- Durata del Trattamento, Modalità di Compattazione (evitare aerazioni superflue),
- Contenuto d'Acqua** (elevato se il contenuto di calce è rilevante)
- Temperatura** (le reazioni risultano accelerate di 4 volte passando da 10 a 20 °C e di 10 volte passando da 20 a 40 °C)
- Materie Organiche** (composti azotati possono ritardare o inibire le reazioni)

Reazioni pozzolaniche



Senza Calce



Con Calce

Il trattamento dei terreni con calce

Effetti sulle miscele a lungo termine

- incrementi sensibili di **resistenza al taglio** (soprattutto in termini di coesione ed in parte anche di angolo di attrito);
 - i valori del **modulo di elasticità** aumentano considerevolmente;
 - valori del **modulo di Poisson** tra 0.08 e 0.12 per sollecitazioni inferiori al 25% della resistenza ultima a compressione;
 - incrementi significativi della **resistenza a fatica**;
 - miglioramento della **durabilità** sotto l'azione dell'acqua e del gelo
-
- Verifica della resistenza delle terre trattate con **prove di compressione e/o di trazione indiretta**;
 - la prova **CBR** a volte potrebbe non risultare idonea per la caratterizzazione di miscele stagionate a lungo termine poiché i valori ricavati da tale prova, superando 100, hanno scarso significato pratico

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione - Qualifica del terreno (verifica idoneità al trattamento)

- **Prelievo di campioni significativi** (rappresentatività e quantità adeguate)

In caso di miglioramenti del sottofondo prelievo da *pozzetti esplorativi* ogni 2000 m² e distanze reciproche minori di 200 m (profondità pari almeno a quella da trattare)

Si dovrà procedere al prelievo, mediante sondaggi, pozzetti o altre indagini, di campioni rappresentativi di ogni litotipo e comunque almeno uno ogni 3000 m³

- **Principali prove da prevedere sul terreno da trattare**

- Granulometria completa (setacciatura e sedimentazione - UNI CEN ISO 17892-4 e UNI CEN ISO 17892-3)
- Contenuto naturale di acqua (UNI CEN ISO 17892-1)
- Limiti di Atterberg (UNI CEN ISO 17892-12)
- Costipamento Proctor con determinazione di w_{opt} (possibilmente 5 punti UNI EN 13286 - 2)
- Contenuto di sostanza organica (ASTM D 2974 – C)
- Contenuto di solfati (UNI EN 1744-1)
- Valore di Blu di metilene VB (UNI EN 933–9–2013_EIT)
- Consumo iniziale di calce CIC (ASTM D 6276) ovvero la percentuale minima in grado di elevare il pH della miscela terra/calce a 12,4

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione - Qualifica del terreno (verifica idoneità al trattamento)

- Valore di Blu di metilene VB (UNI EN 933-9-2013_EIT)

definisce in modo semi-quantitativo l'attività di un terreno cs, riflettendo la quantità e la tipologia dei minerali argillosi presenti

	W _L (%)	W _P (%)	I _P (%)
Montmorillonite	300 - 700	50 - 100	200 - 650
Illite	95 - 120	45 - 60	50 - 65
Caolinite	40 - 60	25 - 40	10 - 25

CARATTERISTICHE DI PLASTICITÀ

Indice Plastico IP	Caratteristiche di plasticità del terreno
0 < IP ≤ 5	Non plastico
5 < IP ≤ 15	Poco plastico
15 < IP ≤ 40	Plastico
IP > 40	Molto plastico

Nasce negli anni 50 negli USA fine anni 70 in Francia

I valori dei limiti di Atterberg sono influenzati sia dalla percentuale che dalla mineralogia della componente argillosa.

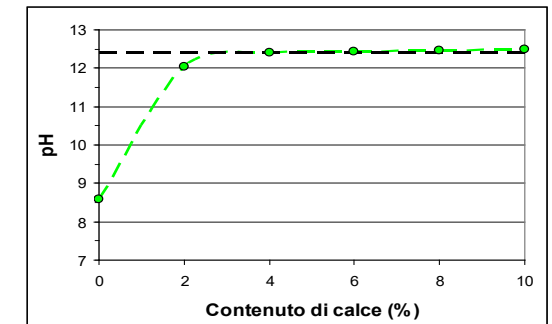
Per capire il tipo di influenza esercitato dalla componente argillosa conviene calcolare l'indice di attività:

$$A = I_p / CF$$

Indice di attività	Terreni
< 0.75	inattivi
0.75-1.25	mediamente attivi
> 1.25	attivi

- Consumo iniziale di calce CIC (ASTM D 6276)

ovvero la percentuale minima in grado di elevare il pH della miscela terra/calce a 12,4



Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione - Qualifica del terreno

- Principali prove da prevedere sul terreno da trattare
 - pH (ASTM D4972);
 - Indice di portanza CBR al 9X% dell'ottimo Proctor (UNI EN 13286 – 47)
 - Indice di portanza immediato IPI al 9X% dell'ottimo Proctor (UNI EN 13286 – 47)

In funzione dell'applicazione ingegneristica

- Prova di taglio diretto su provini compattati al 9X% dell'ottimo Proctor (UNI CEN ISO 17892-10)
- Prova di compressione semplice con misura delle deformazioni su provini compattati al 9X% dell'ottimo Proctor (UNI CEN ISO 17892-7)
- Prova edometrica (UNI CEN ISO 17892-5)
- ...

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione – Studio delle miscele

Quale tipo di calce utilizzare

- viva **CaO** (terreni UMIDI);
- idrata o spenta **Ca(OH)₂** (terreni molto secchi);

I tipi di calce impiegabili nella stabilizzazione dei terreni sono suddivisi in classi (CL 80 e CL 90) UNI EN 459-1

CL80 o CL90 (diverso tenore di ossido)

	Tipo di calce da costruzione	CaO + MgO	MgO	CO ₂	SO ₃	Calce libera
1	CL 90	≥90	≤5 ⁶⁾	≤4	≤2	-
2	CL 80	≥80	≤5 ⁶⁾	≤7	≤2	-

Da UNI EN 459-1

% Calce di progetto	3,00%	3,375%
Tipo di Calce	CL90	CL80
contenuto di CaO + MgO	90	80
Quantità CaO + MgO	2,7	2,7

Importante

- certificati di laboratorio prove su calce
- qualora in fase esecutiva si voglia cambiare il tipo di calce, se le caratteristiche della calce non siano tutte identiche a quelle impiegate in laboratorio, potrebbe essere richiesto di ripetere lo studio completo

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione – Studio delle miscele

Acqua

L'acqua impiegata per la miscelazione e la maturazione non deve influire in modo negativo sulla prestazione delle miscele

Acqua potabile / dolce non inquinata

Se richiesto (e.g. Progettista, CSA, Direzione Lavori ecc...) l'acqua deve essere analizzata e risultare conforme ai requisiti minimi specificati nella norma UNI EN 1008.

Miscela

Per ogni tipo di terreno individuato sarebbe ideale studiare almeno 2-3 miscele

Le miscele saranno preparate aumentando almeno dello 0,5% – 1,0% il CIC individuato e, comunque, il valore percentuale di calce minimo da adottare non dovrà risultare inferiore al 2%, riferito al peso del secco del terreno

(2) A titolo indicativo la quantità di calce che consente di ottenere una miscela con le caratteristiche volute è compresa entro i valori riportati in tabella :


B.U. CNR 36 – Dosaggi suggeriti

stabilizzazione di materiali per	calce	
	viva	idrata
- strati di sovrastruttura	3 – 8 %	4 – 10 %
- bonifiche di terreni	1 – 3 %	1 – 3 %

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione – Studio delle miscele

- Principali prove da prevedere sul terreno trattato
 - Limiti di Atterberg (UNI CEN ISO 17892-12)
 - Costipamento Proctor con determinazione di w_{opt} (possibilmente 5 punti UNI EN 13286 - 2)
 - Indice di portanza CBR al 9X% dell'ottimo Proctor (UNI EN 13286 – 47)
 - Indice di portanza immediato IPI (UNI EN 13286 – 47)

LIMITI DI ACCETTAZIONE DELLE MISCELE TERRA/CALCE 		
Test di Laboratorio	Norma di riferimento	Limiti di accettabilità
Indice di portanza CBR imbibito a 7 giorni, di cui i primi 3 di maturazione e gli ultimi 4 di imbibizione	UNI EN 13286-47	$\geq 20\%$ per gli strati del piano di posa $\geq 50\%$ per gli strati del corpo del rilevato $< 1\%$ per il Rigonfiamento lineare
Indice di portanza immediato (IPI)		≥ 10 (IPI ₁₀)

Stabilizzazione Completa

Il B.U. CNR n.36 stabilisce che per la stabilizzazione completa di terre reattive le miscele devono presentare le seguenti caratteristiche

- CBR e rigonfiamento rispettivamente
 - > 50% e < 1% con 7 gg di stagionatura
 - >20% e < 2% con 7 gg di stagionatura + 4 gg di imbibizione
- resistenze a compressione per strati di SOVRASTRUTTURA
 - > 5 Kg/cmq con 7 gg di stagionatura
 - > 10 Kg/cmq con 28 gg di stagionatura
- resistenze a compressione per SOTTOFONDI
 - > 3 Kg/cmq con 7 gg di stagionatura
 - > 6 Kg/cmq con 28 gg di stagionatura

Miglioramento delle Terre in Sito (Bonifiche)

Il B.U. CNR n.36 stabilisce che per il miglioramento di terre reattive le miscele devono presentare le seguenti caratteristiche

- CBR > 10% dopo una stagionatura di 2h.

Sono idonee all'impiego le miscele aventi contemporaneamente: CBR > 50 e R < 1% nel caso di impiego in rilevati e sottofondazioni e CBR > 80 e R < 0,5% nel caso di fondazioni e basi.

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione – Studio delle miscele

- Principali prove da prevedere sul terreno trattato

In funzione dell'applicazione ingegneristica

- Prova di compressione semplice a 7 gg (e 28 gg) con misura delle deformazioni su provini (3) compattati al 9X% dell'ottimo Proctor (UNI EN 13286-41 / UNI CEN ISO 17892-7)
- Prova di taglio diretto a 7 gg (e 28 gg) su provini compattati al 9x% dell'ottimo Proctor (UNI CEN ISO 17892-10)
- Prova edometrica a 7 gg (e 28 gg) su provini compattati al 9x% dell'ottimo Proctor (UNI CEN ISO 17892-5)
- ...

Prelievo di campioni significativi
(rappresentatività e quantità adeguate)

Sono idonee all'impiego le miscele che forniscono i valori seguenti:
- per sottofondazioni e fondazioni: $R_c > 1,5$ MPa; $R_t > 0,15$ MPa
- per basi e per le ghiaie limo-argillose: $R_c > 2,5$ MPa; $R_t > 0,25$ MPa
- per materiali in opera soggetti a gelo-disgelo: R_c come sopra indicato; $R_t > 0,25$ MPa, su provini sottoposti a un tempo di maturazione tecnicamente ed economicamente compatibile con l'avvento del gelo.

Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione – Studio delle miscele

Relazione di interpretazione della campagna di laboratorio con individuazione:

- della miscela da impiegare nel campo prova
- dei corrispettivi valori dei parametri geotecnici

...farà parte degli elaborati di progetto ed è buona norma che contenga indicazioni:

- sulle modalità esecutive
- sui macchinari previsti per la realizzazione (con particolare riferimento ai rulli compattatori)
- su quanto necessario alla realizzazione del campo prova (dimensioni, spessore, numero di passate rulli, prove di controllo e verifica, etc.)

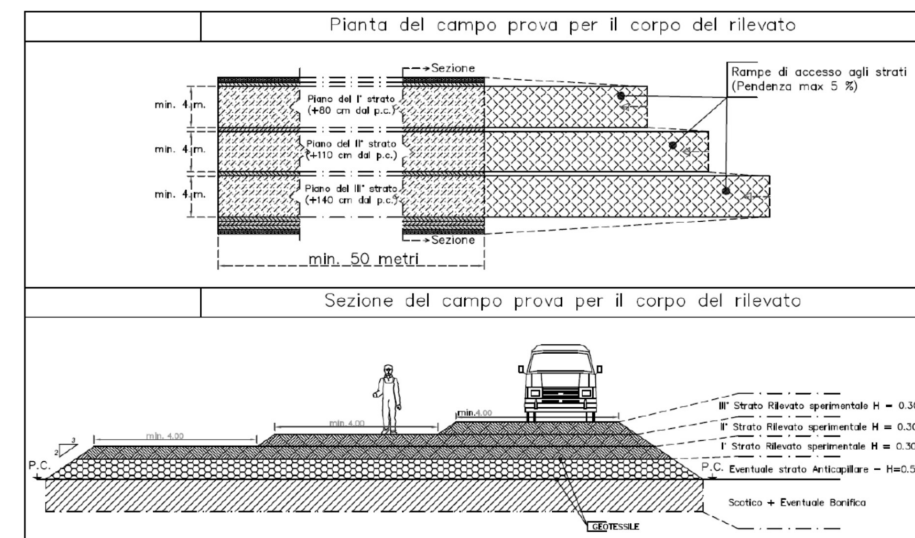
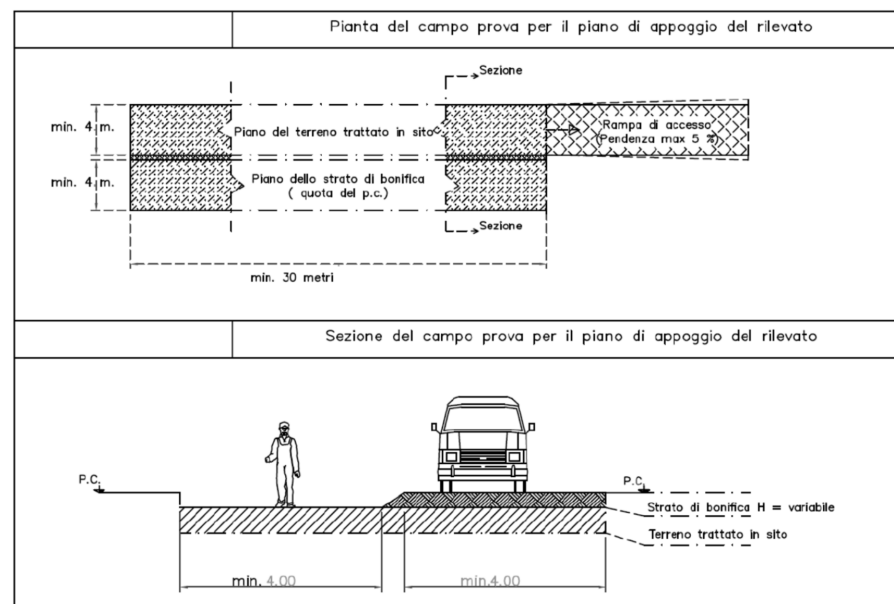
Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione/Esecuzione – Campo prove

- ✓ Validazione sul campo, ed a scala reale, dei dati sperimentali ottenuti in laboratorio
- ✓ Definizione del metodo e delle modalità di compattazione

Dimensioni minime: funzione dell'applicazione specifica

Range indicativi:
Larghezza: 4 – 16 m
Lunghezza: 30 -70 m
Spessore: 0,30 – 1,50 m



Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione/Esecuzione – Campo prove

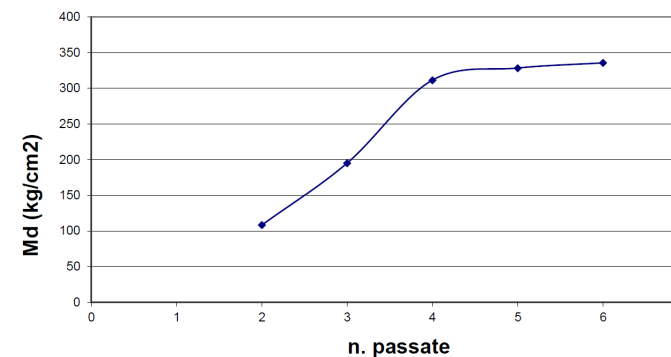
Strategia di compattazione e definizione dello schema di rullatura

Dovranno essere eseguite una serie di passate e dopo ognuna dovranno essere determinati:

- il modulo di deformazione M_d
- il valore di densità secca γ_d

i dati saranno riportati su un grafico e il numero ottimale di passate corrisponde a quello per cui continuando a rullare non si hanno incrementi sensibili del Modulo di deformazione / densità secca

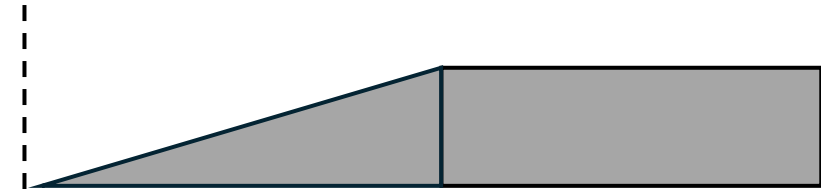
Passate Rullo	Md-a	Md-b	Md-c	Media
n.	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)	(Kg/cm ²)
2	107	110	108	108
3	200	190	195	195
4	309	316	309	311
5	333	326	326	328
6	333	333	341	336



Il trattamento dei terreni con calce

Progettazione/Esecuzione – Campo prove - Controlli

- Preparazione del terreno: misura del w_n ed eventualmente azioni correttive, spessore del materiale steso prima della compattazione che permette l'ottenimento dello spessore massimo previsto dal progetto/capitolato (20-30 cm)
- Spandimento della calce: misura del quantitativo effettivamente apportato
- Miscelazione: da controllare attraverso la finezza di miscelazione (setacciatura a secco) ed in alcuni casi omogeneità con la misura del pH in diversi punti
- Costipamento: da verificare con prove di carico su piastra da 300 mm e prove di densità in sito (e.g. volumometri a sabbia)
- Verifica delle proprietà meccaniche delle miscele: su campioni di miscela prelevati in sito e lavorati in laboratorio (e.g. IPI)



- Dosaggio di calce
 - Prelievo di campioni
 - Omogeneità (pH)
 - Finezza della miscelazione
- Dosaggio di calce
 - Addensamento
 - Portanza
 -



C.N.R. BU N° 146

Frequenze controlli in funzione della estensione del campo prove



CNR BU n° 22/72

Il trattamento dei terreni con calce

Esecuzione – Fasi di lavoro

- Preparazione del sottofondo
- Apporto del materiale da stabilizzare
- Scarificazione e polverizzazione della terra in sito
- Spandimento della calce e dell'acqua
- Miscelazione
- Compattazione
- Maturazione ed esecuzione degli strati sovrastanti

Il trattamento dei terreni con calce

Esecuzione – Fasi di lavoro - Preparazione del sottofondo

➤ Preparazione del sottofondo

- asportazione dello strato più superficiale, con lo scopo di eliminare la vegetazione e la terra più ricca di sostanza organica
- può inoltre essere necessario scarificare le terra, al fine di togliere gli elementi lapidei di dimensioni eccessive



➤ Apporto del materiale da stabilizzare

- carico e trasporto dal cumulo di stoccaggio verso il costruendo rilevato
- scarico del materiale da stabilizzare in sito
- determinazione dell'umidità naturale della terra da trattare
- qualora il terreno da trattare sia troppo secco, dovrà essere umidificato aggiungendo un'opportuna quantità di acqua



Il trattamento dei terreni con calce

Esecuzione – Fasi di lavoro

➤ Scarificazione e polverizzazione della terra in sito

- da eseguirsi per tutto lo spessore e la larghezza prevista dello strato da stabilizzare
- per rimozione di tutti i materiali indesiderati (e.g. radici, residui erbosi e legnosi, inerti di grosse dimensioni $D > 70 - 80$ mm)
- i mezzi da impiegare per tali operazioni sono, sequenzialmente, lame scarificatrici, erpici a disco e polverizzatori a rotore



➤ Spandimento della calce e dell'acqua

- metodo “**asciutto**” (in zone con assenza di vento o poco ventose)
 - distribuzione di sacchi di calce sulla superficie da trattare secondo il dosaggio previsto al m^2 oppure facendo uso di apposito spanditore meccanico
 - spandimento non superiore a quello della superficie lavorabile in 1 giorno per evitare asportazioni a causa del vento e carbonatazione
- metodo “**bagnato**” (in zone molto ventose)
 - preparazione delle miscele acqua-calce in mescolatori centrali in movimento continuo per evitare sedimentazioni durante lo stoccaggio



$$D = \gamma_d \cdot s \cdot \%CaO$$

D = dosaggio di ossido di calcio espresso in Kg/m^2
 γ_d = peso di volume secco del terreno espresso in KN/m^3
 s = spessore di terreno da trattare espresso in metri
 $\%CaO$ = percentuale di ossido di calcio della miscela



Il trattamento dei terreni con calce

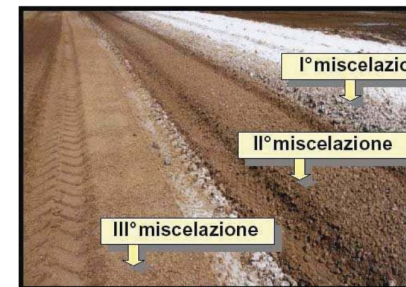
Esecuzione – Fasi di lavoro

➤ Miscelazione

uniformità della miscela è garantita da una adeguata *polverizzazione* della terra in sito mediante pulvimixer

per terre fortemente argillose si può anche procedere in due tempi:

- prima aggiunta di calce (ed eventualmente di acqua) che dà inizio al processo di polverizzazione
- dopo 24 - 48 ore seconda aggiunta di calce che può omogeneizzarsi meglio fino alla riduzione delle zolle di argilla in forma «sabbiosa» passante almeno al 60% al setaccio N.4 ASTM (4,75mm apertura)



%P a 30,0mm non inferiore al 95%
%P a 4,75mm non inferiore al 80%

➤ Compattazione

- da eseguirsi subito dopo la miscelazione finale
- solo quando il contenuto d'acqua della miscela sia compreso in un intervallo tra $W_{opt} \pm x\%$ (2-5)
- le caratteristiche geotecniche della miscela terra-calce orientano la scelta dei rulli e ne condizionano le modalità d'impiego
- fino ad ottenere densità pari al 9X% di quella determinata con la prova Proctor

Il trattamento dei terreni con calce

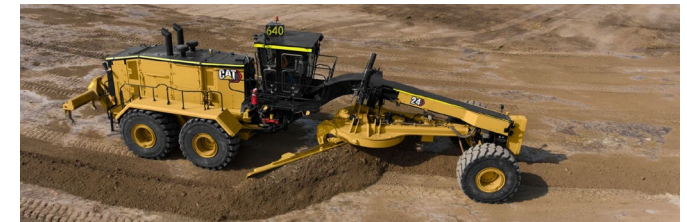
Esecuzione – Fasi di lavoro

➤ Maturazione ed esecuzione degli strati sovrastanti

- Il materiale compattato deve maturare per almeno 7 giorni per consentire l'indurimento prima della costruzione degli strati superiori di pavimentazione
- precauzioni per evitare in tale periodo eccessive perdite di umidità per evaporazione:
 - distribuzioni periodiche di acqua
 - impermeabilizzazione con l'applicazione di una o più mani di emulsione bituminosa

➤ Mezzi generalmente impiegati

- spandicalce
- pulvimixer
- rullo a piede di montone
- graeder
- rullo liscio ferro-gomma
- rullo gommato



Il trattamento dei terreni con calce

Esecuzione – Controlli in corso d'opera

- Prove di accettazione del materiale da stabilizzare

Prove di accettazione

Granulometria completa

Limiti di consistenza

Contenuto di sostanze organiche

Contenuto di solfati

Consumo iniziale di calce

Costipamento Proctor

Possibile frequenza delle prove 1/3000 m³
se proveniente da banco omogeneo

- Controllo della posa degli strati (pendenza e spessore)

frequenza 1/2000 m³



- Caratteristiche geometriche del rilevato (pendenza delle scarpate, spessore dello strato vegetale, ecc.)

frequenza giornaliera o comunque funzione della grandezza e della produzione del cantiere

Il trattamento dei terreni con calce

Esecuzione – Controlli in corso d'opera

- Prove di controllo durante le lavorazioni con indicazione di possibili frequenze

Prove di controllo	Frequenza
Contenuto di acqua operativo	a discrezione
Contenuto di acqua della miscela	3 al giorno
Quantità di legante (calce)	1/1.000 m ²
Finezza della miscelazione	1/500 m ²
Omogeneità della miscelazione	1/2.000 m ²
IPI (in laboratorio)	3 al giorno
Modulo di deformazione M _d	1/2.000 m ²
Densità in situ γ_d	1/2.000 m ²

Almeno una per strato

Esistono in commercio misuratori elettronici per l'umidità, ma il metodo migliore rimane quello di prelevare un campione di terreno, pesarlo prima e dopo l'essiccazione in forno

Criteri di accettazione:
funzione dei requisiti di progetto

Scostamento max del pH dal valore medio dello 0,5%

IPI in situ tra 6 – 15 funzione IP iniziale

- modulo di deformazione Md (B.U. CNR n.36):
 - > 150 Kg/cm² per bonifiche di terre;
 - > 400 Kg/cm² per miglioramenti del sottofondo;
 - > 800 Kg/cm² per strati di sovrastruttura

Densità in situ tra 95%-98% ottimo

Piano dei Controlli

Il trattamento dei terreni con calce

Esecuzione – Controlli in corso d'opera - Ausiliari

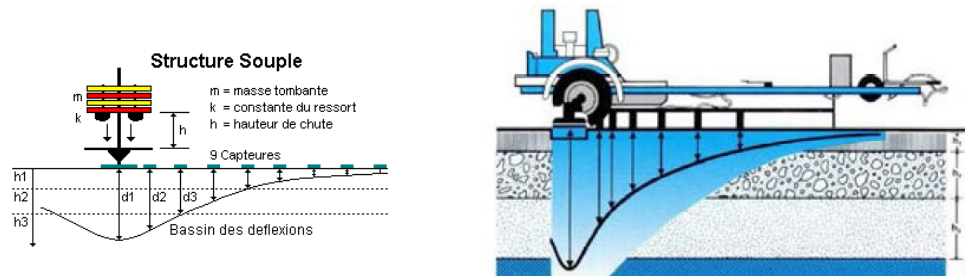
Impiego di rulli con compattometro



Figura 2. Compattometro tipo MDP

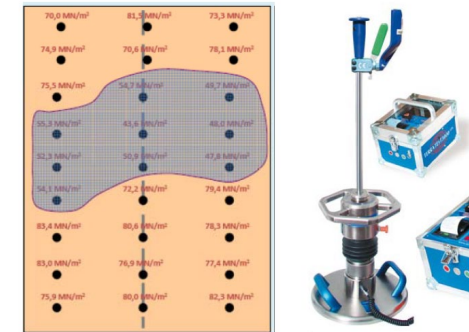
permette di ricavare i valori di compattazione del terreno misurando la resistenza all'avanzamento del rullo (coppia applicata al tamburo)

Falling Weight Deflectometer (F.W.D.).



Modulo elastico da tarare con prove statiche

Prove di piastra dinamica



Modulo dinamico da tarare con prove statiche

Per avere delle informazioni sul grado di costipazione del rilevato in continuo

Grazie per l'attenzione

