



LABORATORIO GEOMECCANICO ORAZI SAS

Trattamento con calce e cemento per il
ripristino ambientale di un sito inquinato

INERTIA 2015
4° Salone sul Recupero dei Rifiuti Inerti



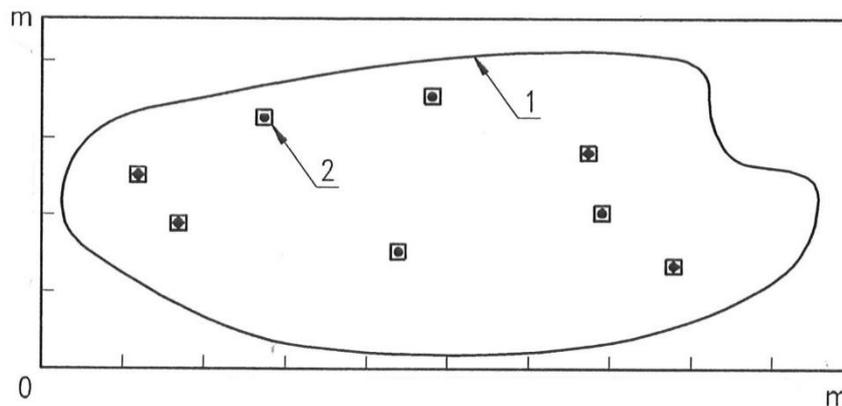
Introduzione del problema



- tra gli anni 1920-2000 l'area è stata occupata da uno stabilimento per la produzione di piastrelle in ceramica
- geologicamente il sito ricade in un terrazzo alluvionale caratterizzato dalla presenza di terreni a grana fina fino a 13,00 m dal p.c.; la falda si trova ad una profondità compresa tra 5,00÷7,50 m
- area di intervento ha una superficie di ~ 5,5 ha
- l'intera area è stata sottoposta per 80 anni ad un eccessivo carico di componenti inquinanti che ne hanno compromesso le caratteristiche chimico-fisiche originarie

Scopo del lavoro e campionamento

- scopo del lavoro è quello di procedere ad un intervento di bonifica cercando di riutilizzare il terreno trattato (rifiuto), evitando/limitando il conferimento in discarica
- nel cantiere sono stati eseguiti 25 sondaggi e 45 pozzetti; l'ubicazione dei sondaggi e degli scavi è stata effettuata dai Tecnici incaricati in base alle loro conoscenze e necessità **(campionamento casuale)**



1: confine area campionamento
2: posizione scavo/sondaggio



Informazioni generali



- durante la campagna geognostica sono stati prelevati n. 100 campioni su cui sono stati effettuati test di cessione (i risultati sono riportati a pagina 7)
- da quanto sopra risulta che il materiale contaminato è compreso tra 0,5÷2,5 m dal p.c. ed è distribuito su tutta l'area di intervento; è un terreno limoso-argilloso mediamente plastico misto a frammenti di laterizi, materiali ceramici, calcestruzzo, plastica, legno e dal contenuto di alcune vasche adibite alla raccolta dei fanghi di lavorazione
- complessivamente il materiale da bonificare è ~ **80.000 m³**

Informazioni generali

- il materiale accantonato e parzialmente asciugato (**reso comunque lavorabile**) è stato frantumato e vagliato al setaccio con apertura 20 mm (questa operazione è stata eseguita utilizzando un vaglio stellare)



Informazioni generali



- sulla frazione trattenuta (**materiale grossolano**) sono state eseguite prove chimiche che hanno dato esito positivo; successivamente il materiale grossolano è stato impiegato per lavori eseguiti in cantiere (ritombamenti, strati drenanti, etc.)
- il **materiale a grana fina** (≤ 20 mm) è stato ulteriormente frantumato e vagliato al setaccio con apertura 4 mm; la frantumazione è proseguita fino a quando il materiale passante è risultato essere $\geq 95\%$ (**materiale tal quale**)
- sul materiale tal quale sono stati eseguiti test di cessione; i provini sono stati confezionati secondo quanto prescritto nella norma UNI EN 12457-2 (**materiali granulari**)



Analisi chimiche eseguite prima della bonifica

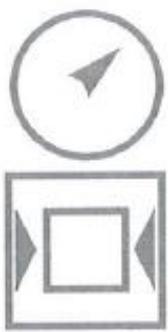
(ex DM 186/06 Allegato 3)



Posizione	Parametro	Limite Max	Test di cessione
1	Rame Cu (mg/L)	0,05	0,032
2	Zinco Zn (mg/L)	3	0,3
3	Berillio Be ($\mu\text{g/L}$)	10	1
4	Cobalto Co ($\mu\text{g/L}$)	250	25
5	Nichel Ni ($\mu\text{g/L}$)	10	8
6	Vanadio V ($\mu\text{g/L}$)	250	45
7	Arsenico As ($\mu\text{g/L}$)	50	170,9
8	Cadmio Cd ($\mu\text{g/L}$)	5	0,5
9	Cromo totale Cr ($\mu\text{g/L}$)	50	23,9
10	Piombo Pb ($\mu\text{g/L}$)	50	317,5
11	Selenio Se ($\mu\text{g/L}$)	10	10,6
12	Mercurio Hg ($\mu\text{g/L}$)	1	0,58

l'arsenico, il piombo e il selenio superano i limiti di norma
(i dati riportati in tabella rappresentano il valore medio di 100 determinazioni)





Inertizzazione

- nei terreni contaminati gli inquinanti si concentrano nei materiali a grana fina, preferibilmente plastici e quindi trattabili con calce e cemento
- vista la natura del terreno inquinato e la presenza di determinati metalli pesanti i Tecnici incaricati hanno deciso di affrontare la bonifica tramite i **processi di inertizzazione** (*processi di stabilizzazione chimica e di solidificazione S/S*)
- la ricetta proposta è costituita dal **2% di CaO** e il **3% di cemento Portland 32,5**; l'azione sinergica del legante idraulico e aereo garantisce l'omogeneità del trattamento anche di sedimenti eterogenei



Inertizzazione

- tra gli additivi (inorganici e basici) la **calce e il cemento** sono tra i più utilizzati per :
 - i benefici sull'inertizzazione
 - la semplicità d'utilizzo
 - il costo relativamente contenuto
 - la disponibilità sul mercato
 - la compatibilità ambientale
- l'efficacia del trattamento e la sua messa a punto va valutata con prove in grado di verificare:
 - il raggiungimento delle caratteristiche prestazionali
 - il rilascio degli inquinanti dal rifiuto inertizzato



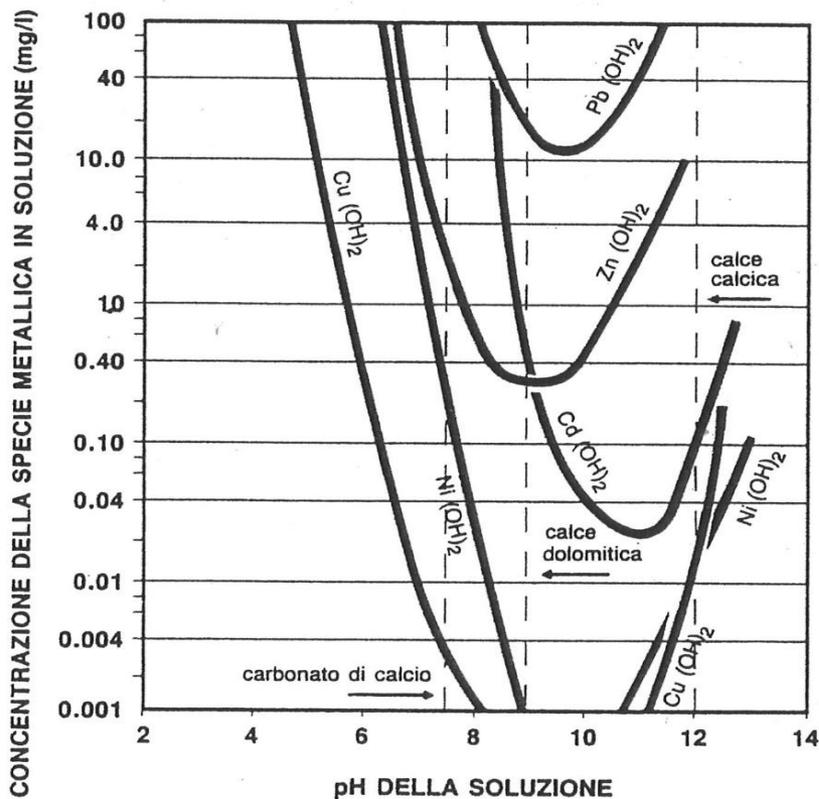
Inertizzazione



i processi di inertizzazione eseguiti con calce e cemento portano alla:

1. creazione di un ambiente basico in grado di innescare reazioni che favoriscono la formazione di idrossidi di metalli pesanti e sali di calcio insolubili che normalmente precipitano (*stabilizzazione chimica*); con questo processo i contaminanti vengono convertiti nella loro forma meno solubile, meno mobile e meno tossica
2. formazione di composti stabili con elevate caratteristiche geotecniche (silico-alluminati idrati di Ca-CSAH) in grado di incapsulare gli inquinanti all'interno della matrice (*solidificazione*)

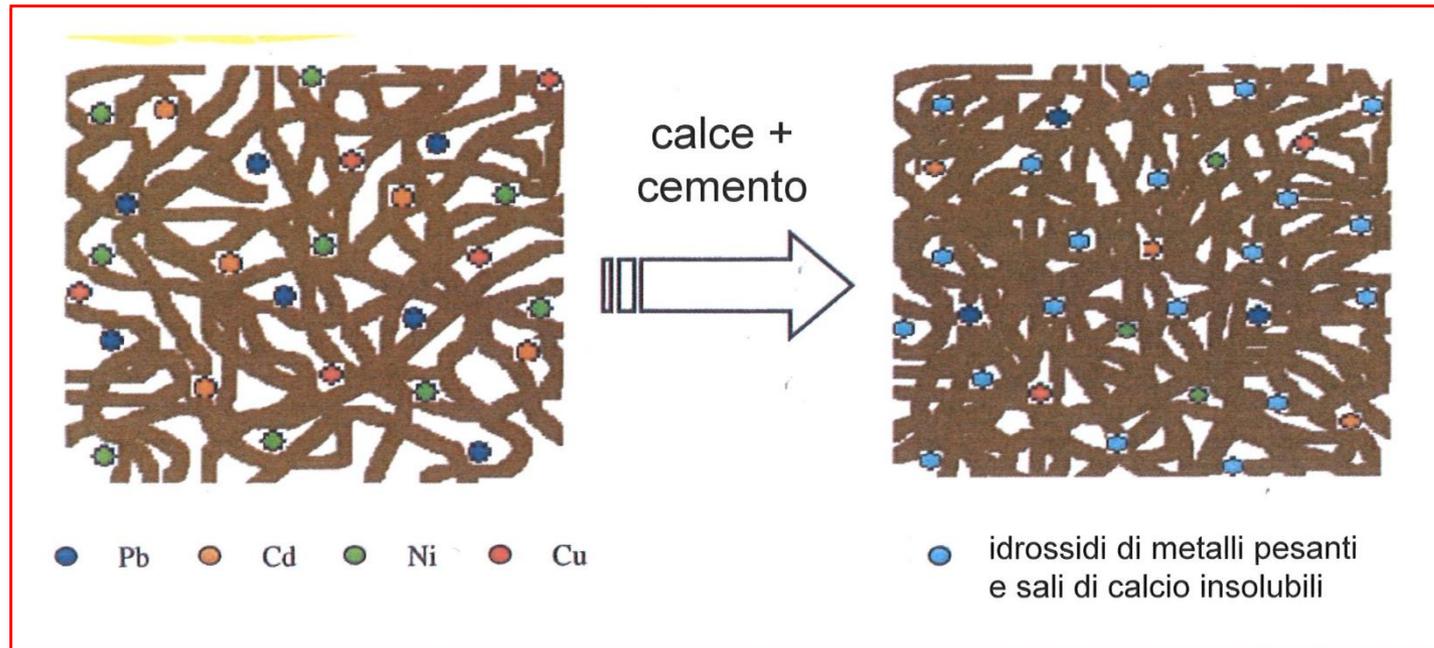
Effetto del trattamento con calce e cemento



in figura vengono rappresentati i valori di pH favorevoli alla trasformazione in idrossidi insolubili di alcuni metalli pesanti presenti nel terreno inquinato



Effetto del trattamento con calce e cemento



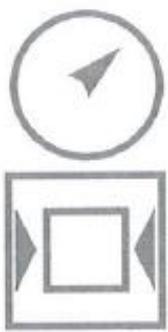
formazione di idrossidi di metalli pesanti e sali di calcio insolubili incapsulati nel terreno inertizzato



Inertizzazione

- normalmente le terre mescolate con il calce e cemento induriscono; non sono adatte al trattamento quelle ad alto contenuto organico perché ritardano la presa ($SO \leq 4\%$ ottenuta per calcinazione a $440 \pm 22 \text{ }^\circ\text{C}$ secondo la norma ASTM D 2974/C)
- il processo di solidificazione si basa sul fenomeno di idratazione del cemento; anche la calce partecipa alla fase di solidificazione del rifiuto (quella in eccesso rispetto al CIC non coinvolta nella flocculazione)
- la solidificazione trasforma il rifiuto in un materiale estremamente compatto in grado di ridurre/eliminare la mobilità degli inquinanti e la loro possibile dispersione nel terreno (**incapsulamento dell'inquinante**)





Inertizzazione

- per valutare l'idoneità dei terreni ad essere trattati con la miscela di progetto sono state eseguite prove geotecniche di laboratorio mentre per verificare i **parametri su scala reale** è stato realizzato un campo prova ed eseguite prove in sito
- lo studio è stato impostato seguendo lo schema proposto dal CNR nel B.U. n.36 (stabilizzazione dei terreni con calce)
- anche se la calce ed il cemento hanno tempi di maturazione diversi in questo caso (**in via sperimentale**) sono stati miscelati contemporaneamente; la miscela è stata confezionata dalla Ditta UNICALCE SpA ed è commercializzata con il nome di **STABILMASS**

Inertizzazione



- le prove eseguite, anche a lungo termine, non hanno evidenziato anomalie nei dati ottenuti per cui i Tecnici incaricati hanno deciso di **aggiungere nel terreno calce e cemento contemporaneamente** anche durante l'esecuzione dei lavori
- questa procedura :
 1. ha evitato la ripetizione di alcune operazioni di cantiere quali la:
 - a. stesa del legante
 - b. fresatura del pacchetto da trattare
 - c. correzione del contenuto d'acqua
 2. ha contribuito ad abbattere i costi in maniera significativa



Analisi eseguite sul terreno tal quale

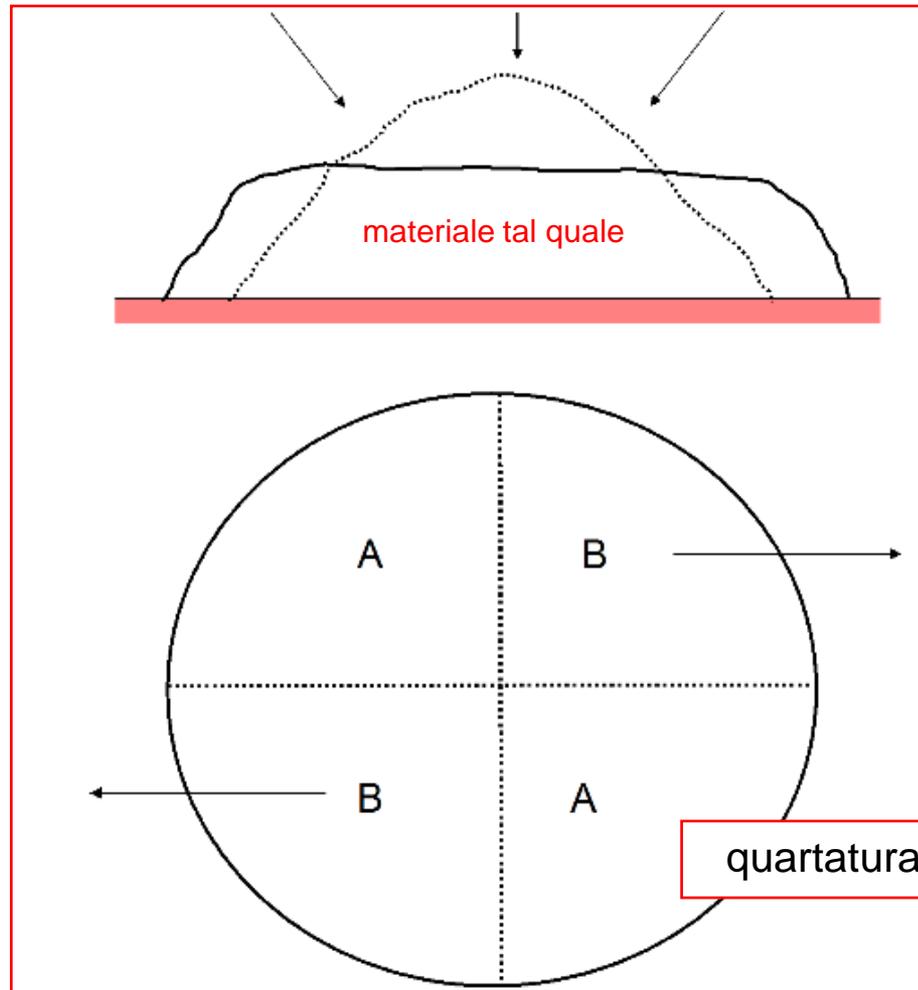
Schema intervento

- scelta di un campione rappresentativo
- caratteristiche del materiale (classificazione)
- consumo iniziale di calce

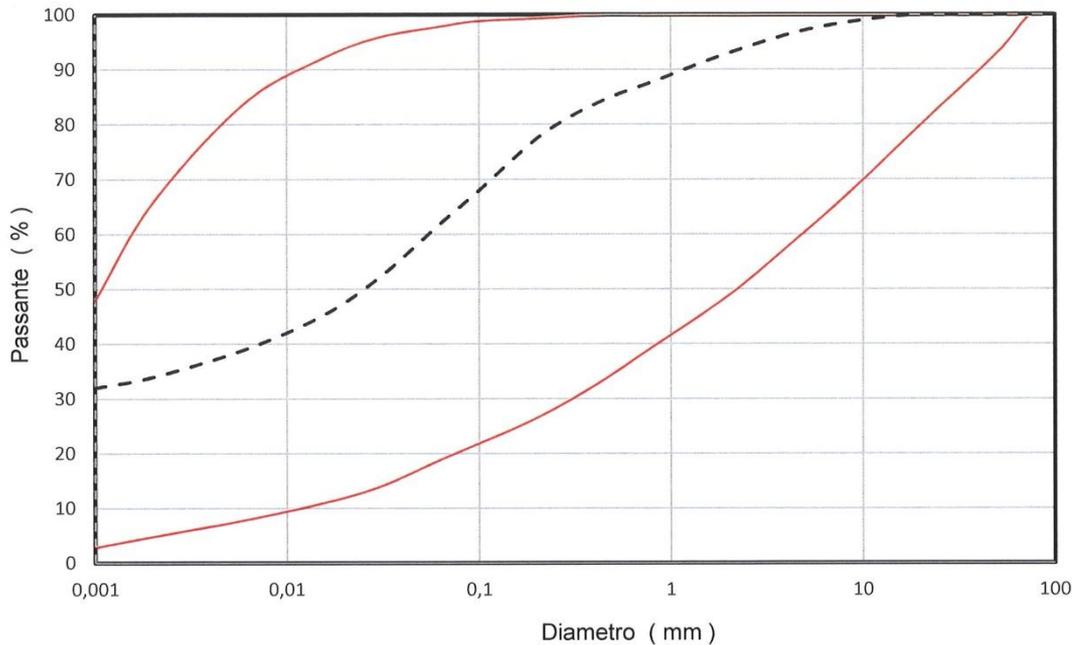


Scelta di un campione rappresentativo

(CNR BU n. 25)



Caratteristiche del materiale tal quale



Pass. 20,0 mm = 100 %

Pass. 4,00 mm 96 %

Pass. 2,00 = 93%

Pass. 0,42 mm = 84 %

Pass. 0,074 = 63 %

WI = 39 %

Ip = 15 %

Class. UNI 10006 : **Gruppo A6**

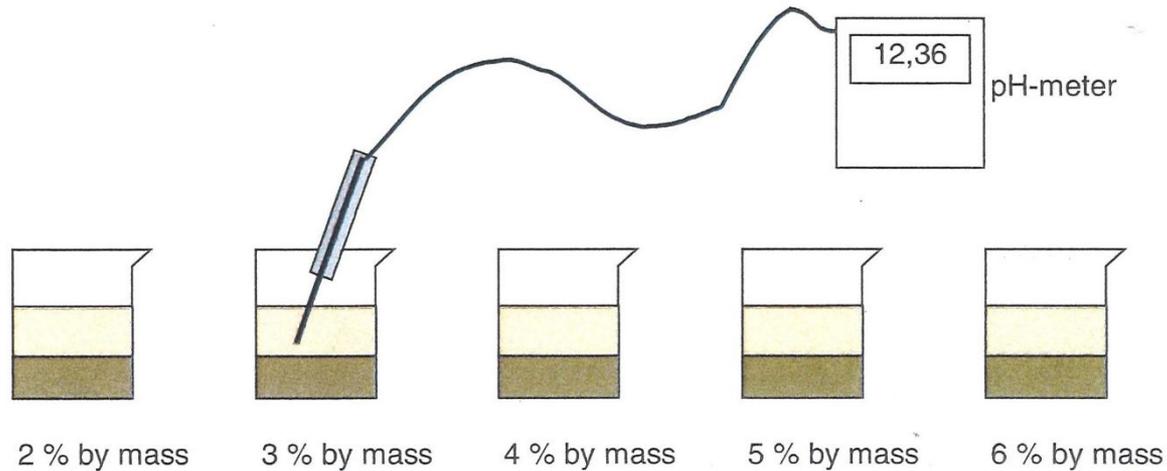
sostituita da (UNI 11531-1)

Consumo iniziale di calce

(ASTM D 6276)

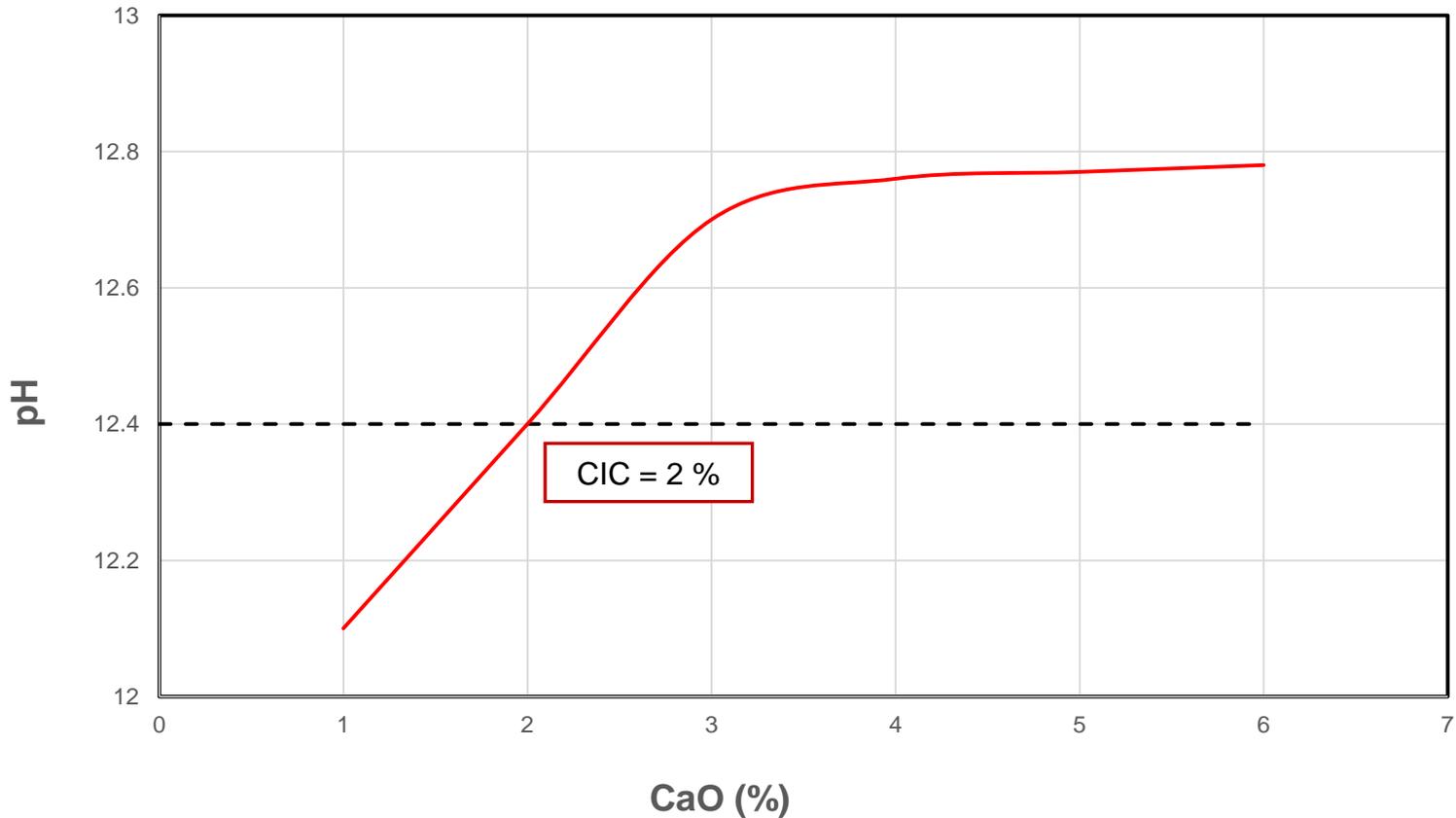


Schema di prova



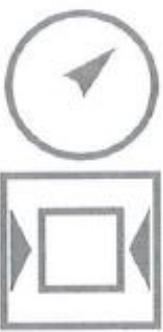
Consumo iniziale di calce

(ASTM D 6276)





Analisi e prove eseguite sul terreno
additivato con il 2% di CaO + 3%
cemento Portland 32,5



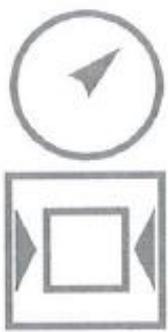
Programma di prove

Prove di laboratorio

- prova di compattazione Proctor Standard
- prova di compressione semplice
- prova di penetrazione CBR
- test di cessione

Prove in sito

- controllo del contenuto in acqua
- controllo del grado di compattazione
- prova di carico su piastra
- prelievo di campioni per verificare i risultati delle prove laboratorio e test di cessione



Prove di laboratorio

- le prove di laboratorio si eseguono
 1. per lo studio preventivo della miscela
 2. durante la realizzazione del campo prova sul materiale messo in opera prelevato prima della compattazione

- i risultati delle prove eseguite sul materiale prelevato in sito devono essere confrontabili a quelli ottenuti dalle prove preliminari ($Q_{\text{sito}} \geq Q_{\text{studio}}$)

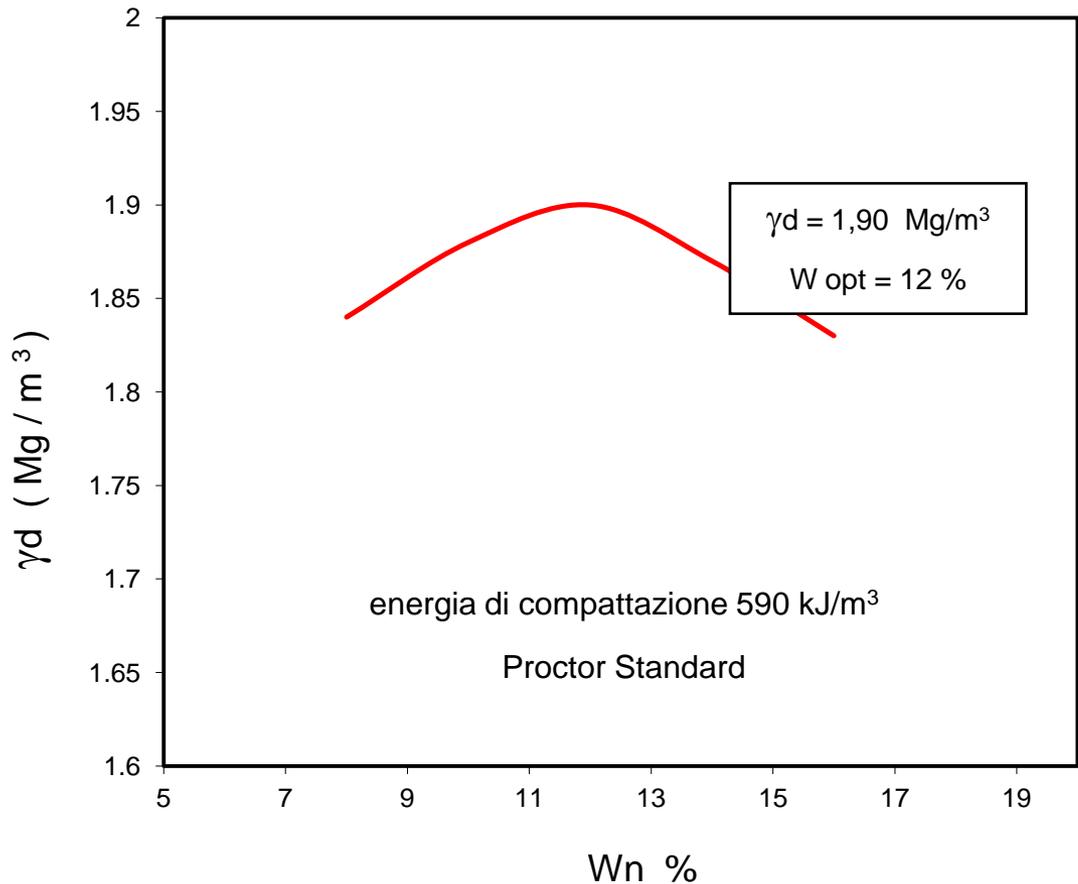
- i test di cessione sono stati eseguiti su campioni monolitici confezionati con energia di compattazione di 590 kJ/m^3 (Proctor Standard) in fustella da 1 litro

Prova di compattazione Proctor

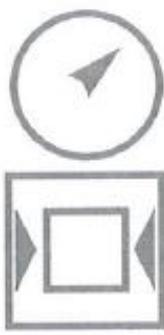
(CNR BU n. 69)



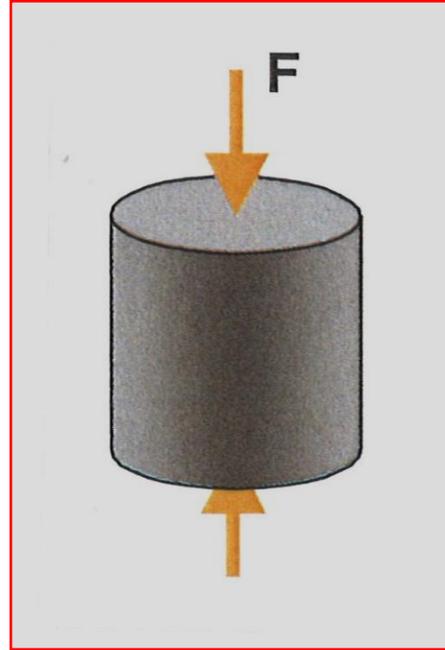
apparecchiatura di prova



Prova di compressione su campione insaturo



provini confezionati con
energia di compattazione
di 590 kJ/m^3 e
 $W_n = W_{opt} \pm 2 \%$



schema di prova



apparecchiatura di prova

$R_c = 0,6 \div 1 \text{ MPa}$

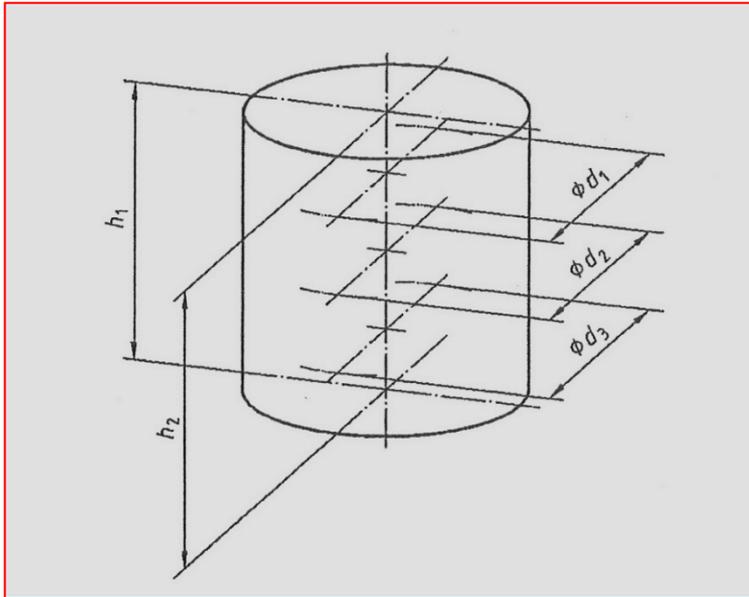
Dato di capitolato

$R_c = 1,70 \text{ MPa}$

Dato di prova

Prova di compressione su campione saturo

(da CNR BU n. 29)



determinazione del volume



fase di saturazione

$R_c = 0,6 \div 1 \text{ MPa}$

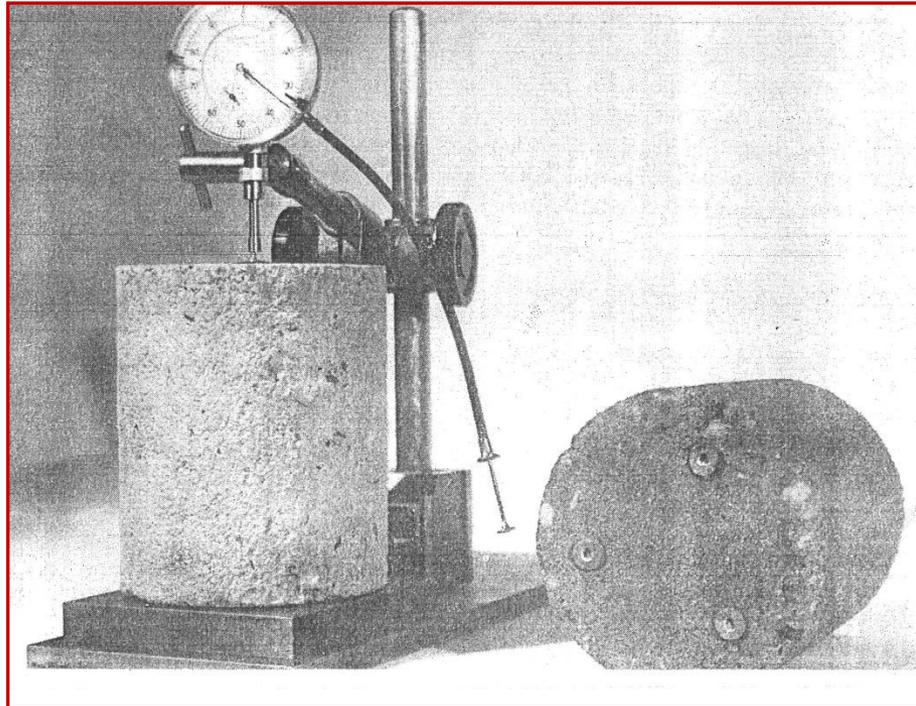
Dato di capitolato

$R_c = 0,7 \text{ MPa}$ $R_{ig} = 0,9 \%$

Dato di prova

Prova di compressione

(da CNR BU n. 29)

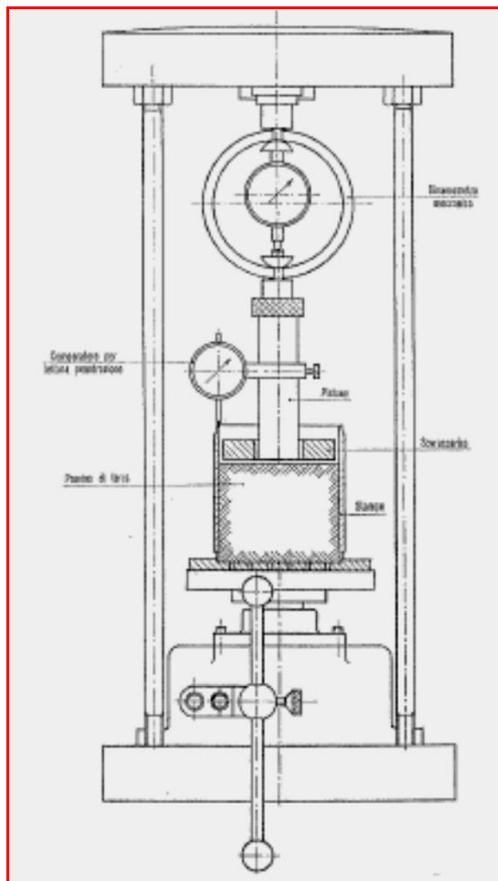


per facilitare la misura delle dimensioni del campione è possibile inserire dei riferimenti fissi prima della fase di saturazione

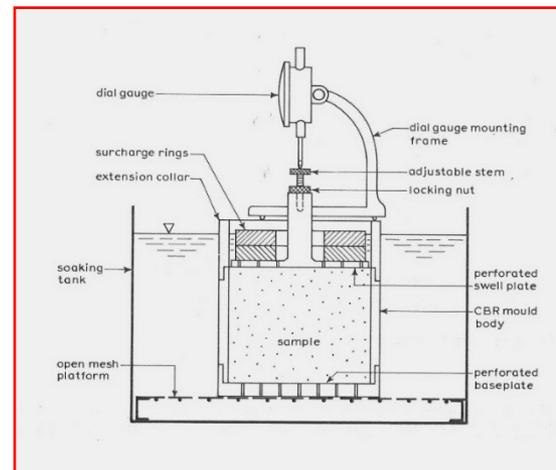
Prova di penetrazione CBR

(CNR UNI 10009)

provini confezionati con
energia di compattazione
di 590 kJ/m^3 e
 $W_n = W_{opt} \pm 2\%$



schema di lavoro



fase di rigonfiamento

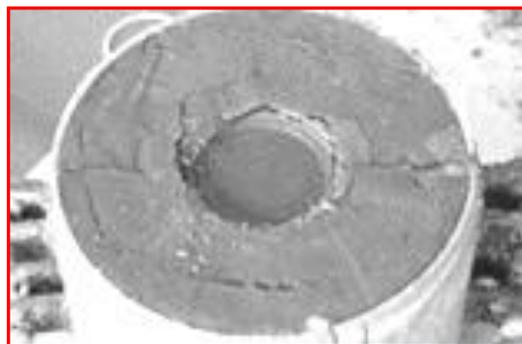
$I_{CBR(0)} \geq 10\%$
 $I_{CBR(7+4)} \geq 40\%$ $Rig. \leq 1\%$

Dato di capitolato

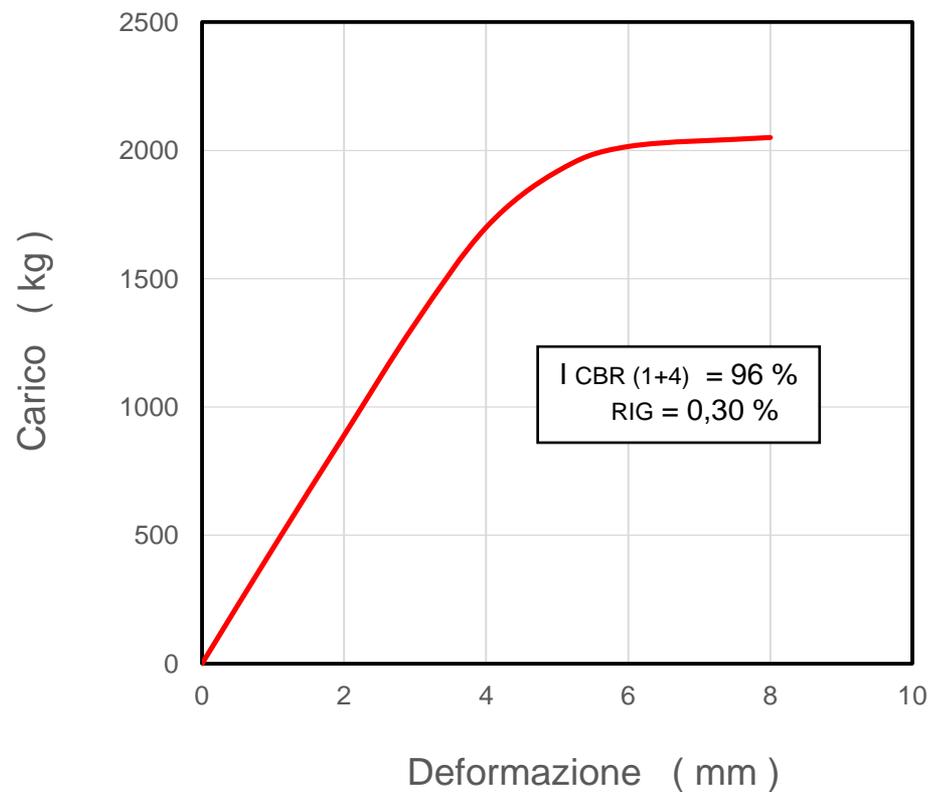


Prova di penetrazione CBR

(CNR UNI 10009)

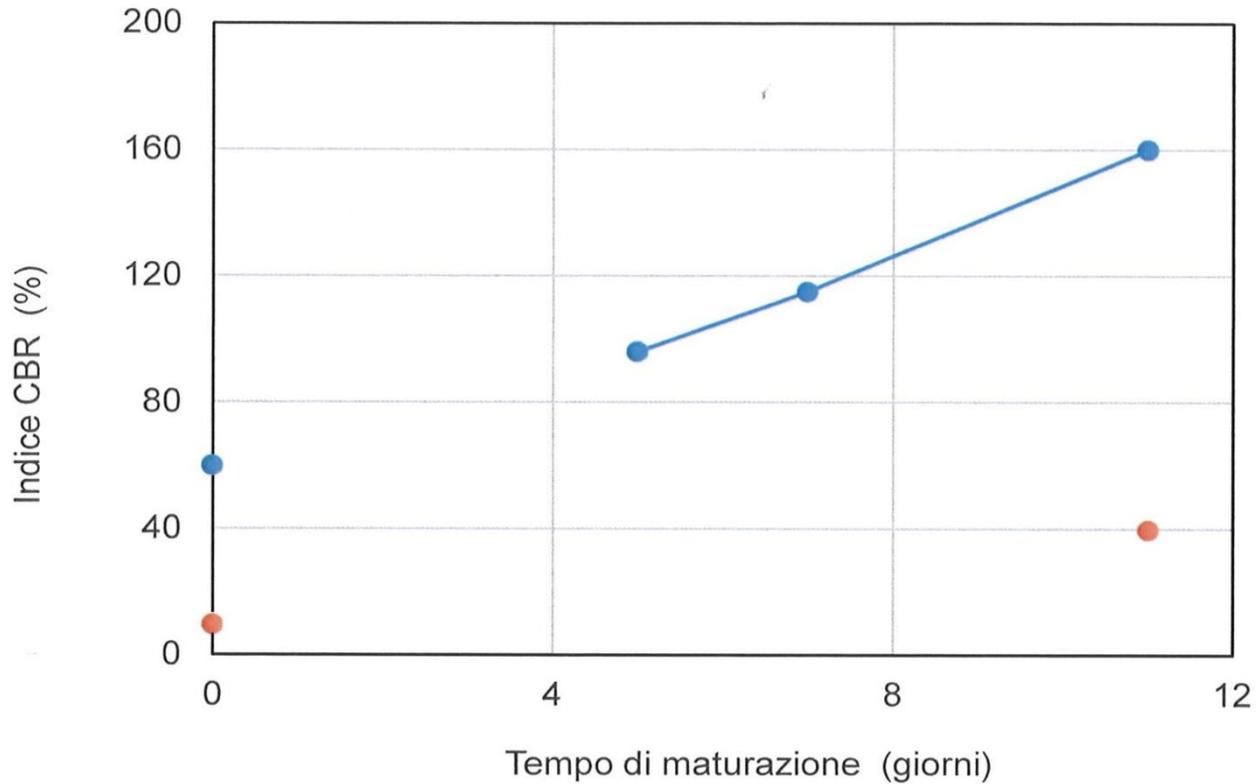


impronta di penetrazione



Penetrazione CBR

(CNR UNI 10009)



—●— Dati di prova —●— Dati di capitolato

Realizzazione del campo

Programma di lavoro

- delimitazione del *campo prova*
- carico, trasporto, stesa e livellamento del terreno inquinato
- taratura dello spandi-legante
- stesa del legante
- fresatura del pacchetto terreno + legante
- correzione del contenuto d'acqua
- prelevamento di materiale per prove geotecniche di verifica
- compattazione
- prove di controllo
- prelevamento dei campioni per analisi chimiche



Condizioni di lavoro

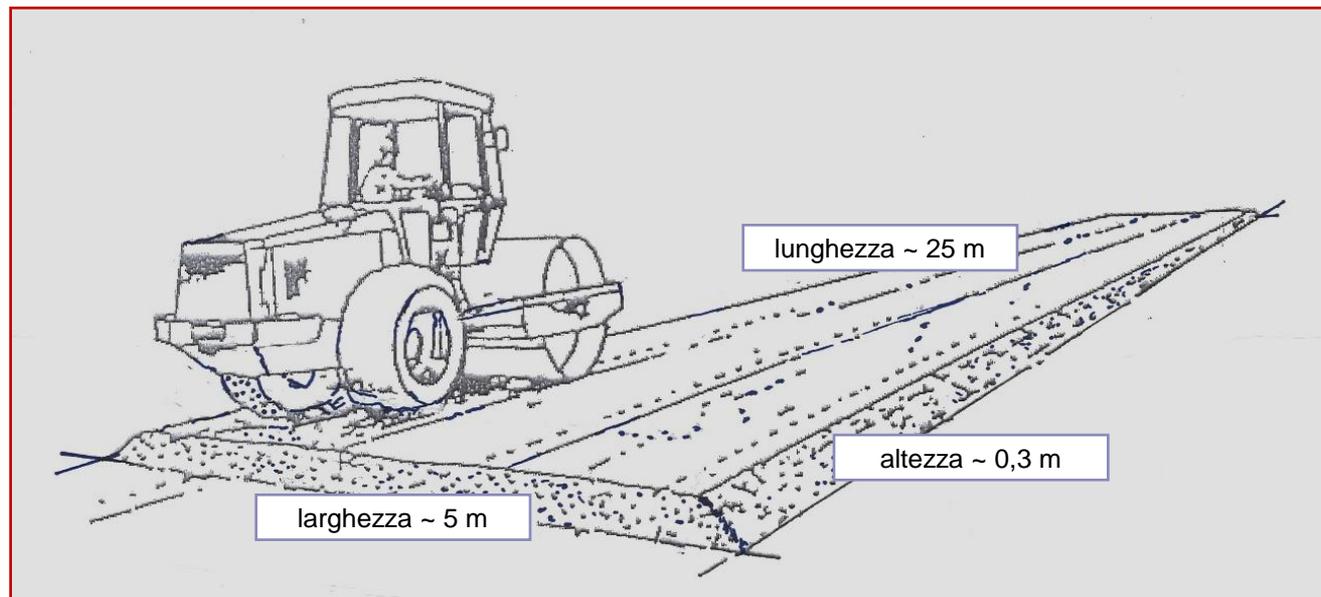


- la velocità del vento $V \leq 20$ km/h
- assenza di pioggia
- la temperatura dell'aria $T > 5^{\circ}\text{C}$
- devono essere esauriti eventuali fenomeni di disgelo



Campo prova

- all'interno del cantiere è stato allestito un *campo prova* per testare l'efficacia del trattamento ed individuare le procedure operative da adottare in fase esecutiva



il *campo prova* va sempre eseguito ad eccezione di lavori dove i volumi di materiale movimentati siano trascurabili

Stesa e preparazione del terreno inquinato



stesa e livellamento del terreno da trattare



Taratura dello spandilegante



1
posizionamento del
contenitore sotto lo
spandi-legante



2
passaggio dello
spandi-legante sul
contenitore



3
deposito del legante
sul contenitore



4
pesata del legante

Stesa del legante

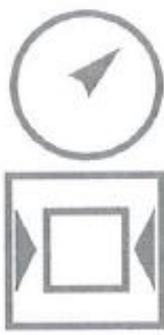


grebbiuli para-polvere

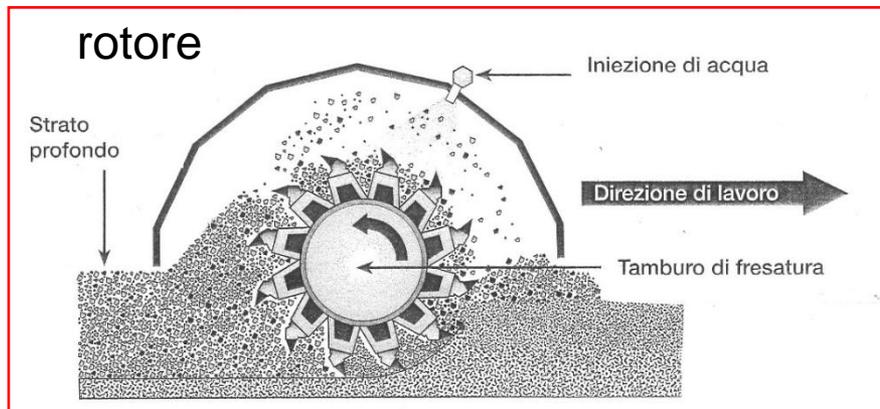


per limitare di disperdere il legante nell'ambiente è opportuno:

- a. adoperare un legante a bassa polverosità (se disponibile) o un prodotto con una granulometria idonea ad ottimizzare il processo inertizzazione/dispersione del materiale
- b. utilizzare idonei grebbiuli para-polvere
- c. che lo spandi-legante proceda alla velocità ≤ 3 km/ora
- d. che la velocità del vento sia < 20 km/ora



Fresatura del terreno e adeguamento del contenuto d'acqua

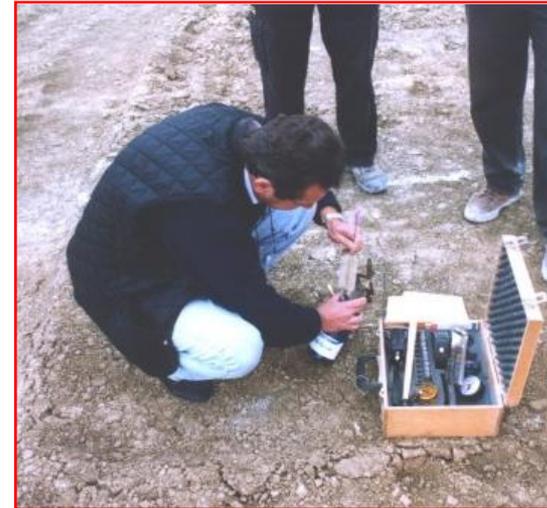
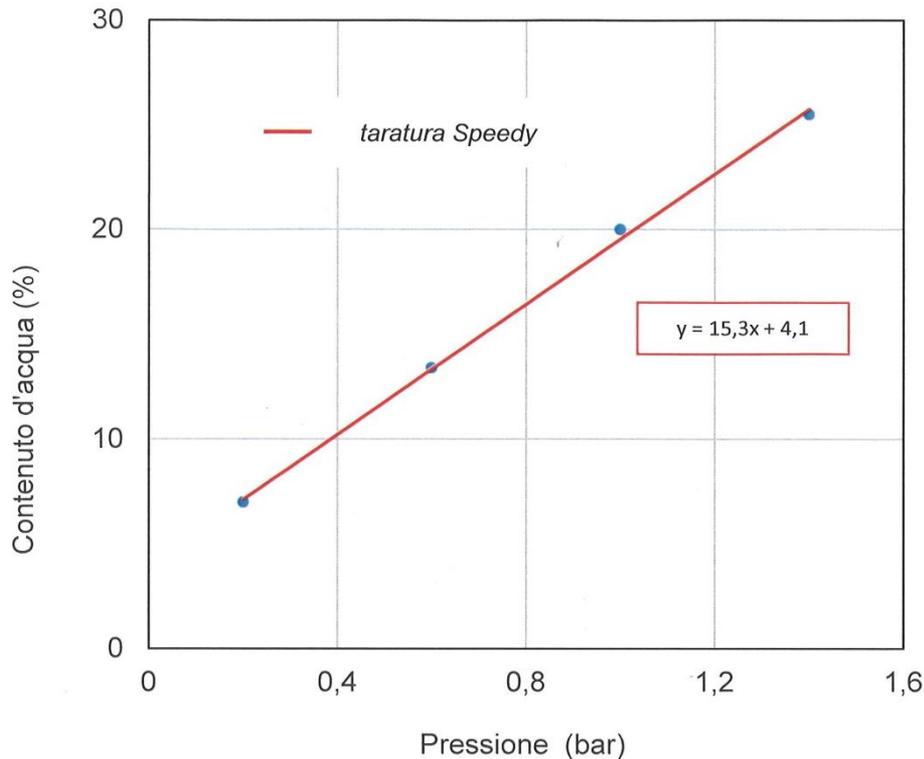


$$W_n = W_{opt} \pm 2\%$$

l'umidificazione del terreno è avvenuta dal coperchio del rotore

Controllo del contenuto d'acqua in sito

ASTM D 4944



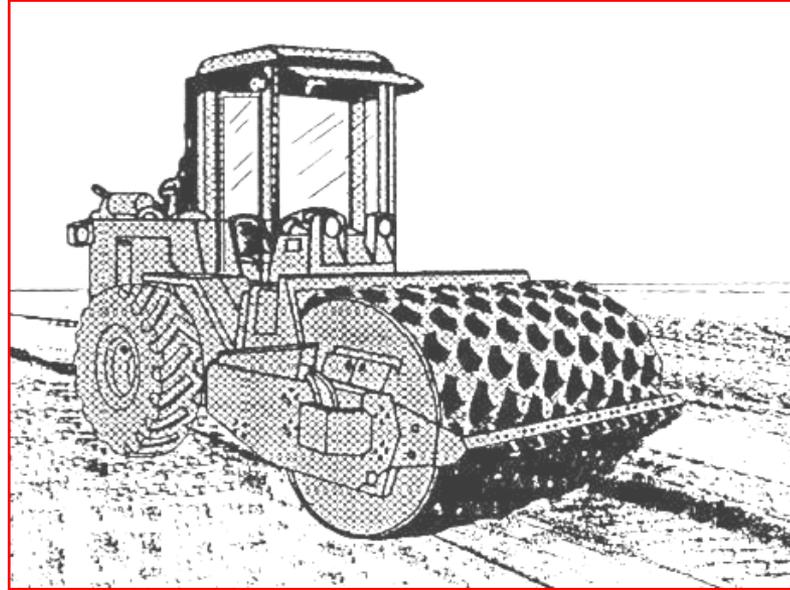
speedy



la pressione che si sviluppa quando il terreno umido va a contatto con il carburo di calcio è correlabile al contenuto d'acqua

Compattazione del terreno

ruolo a piede di montone



ruolo liscio

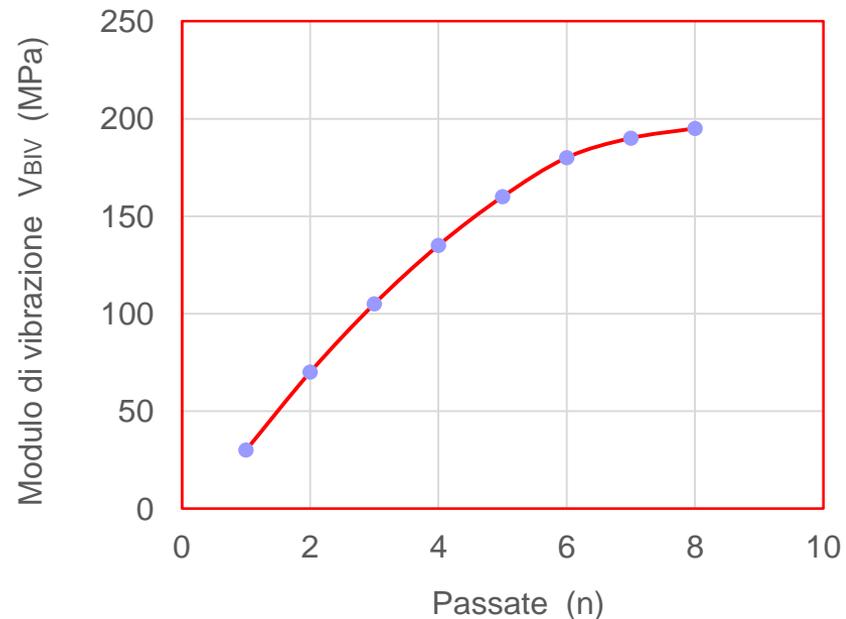


la compattazione è l'operazione che incide maggiormente sulle prestazioni meccaniche del terreno; lo schema di rullatura e il numero di passate da utilizzare in fase esecutiva va individuato durante la realizzazione del campo prova

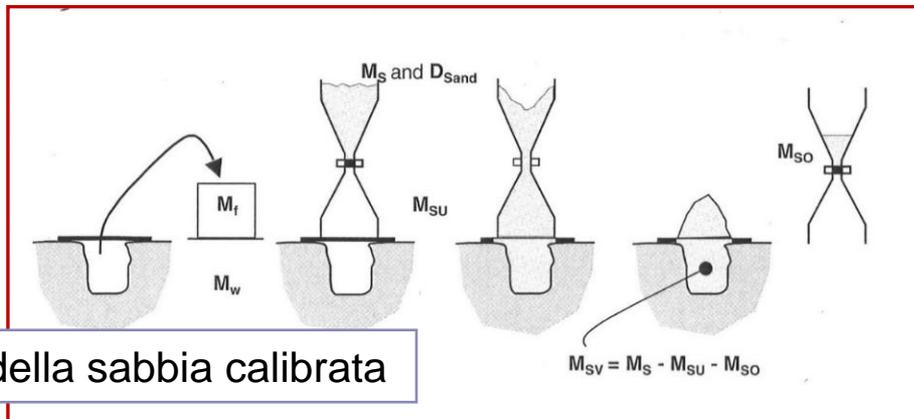


Compattazione del terreno

- alcuni mezzi dispongono di un sistema automatico in grado di controllare la compattazione in tempo reale (serve anche per individuare zone ancora da lavorare)
- il parametro di riferimento è il **modulo di vibrazione E_{VIB}** da confrontare con M_d che si ottiene dalla prova di carico su piastra; il confronto va sempre eseguito anche come forma di **taratura**



Controllo del grado di compattazione (Metodo della sabbia calibrata)



metodo della sabbia calibrata

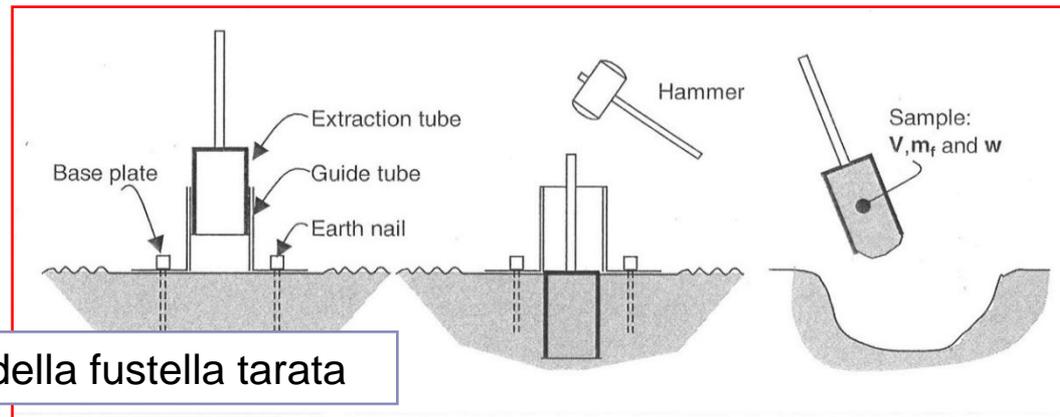
GdC \geq 95 %

Dato di capitolato

GdC \geq 97 %

Dato di prova

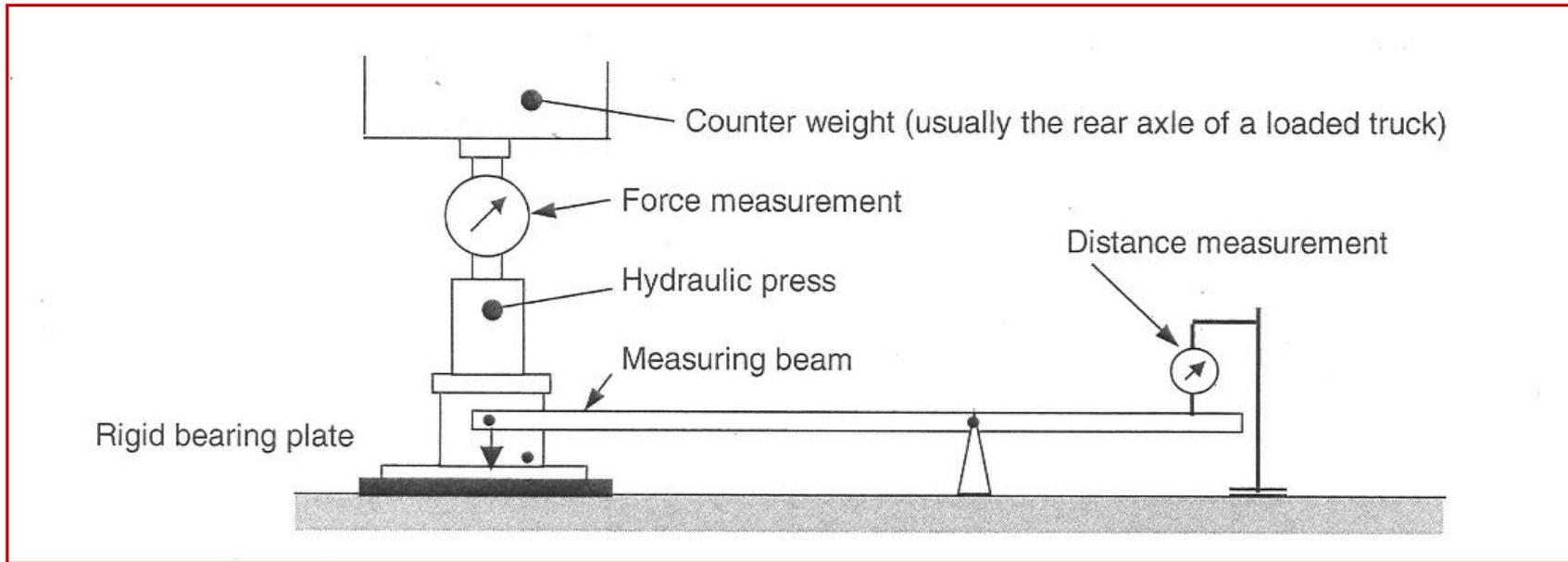
la densità in sito va eseguita
immediatamente dopo la
compattazione



metodo della fustella tarata

Prova di carico su piastra

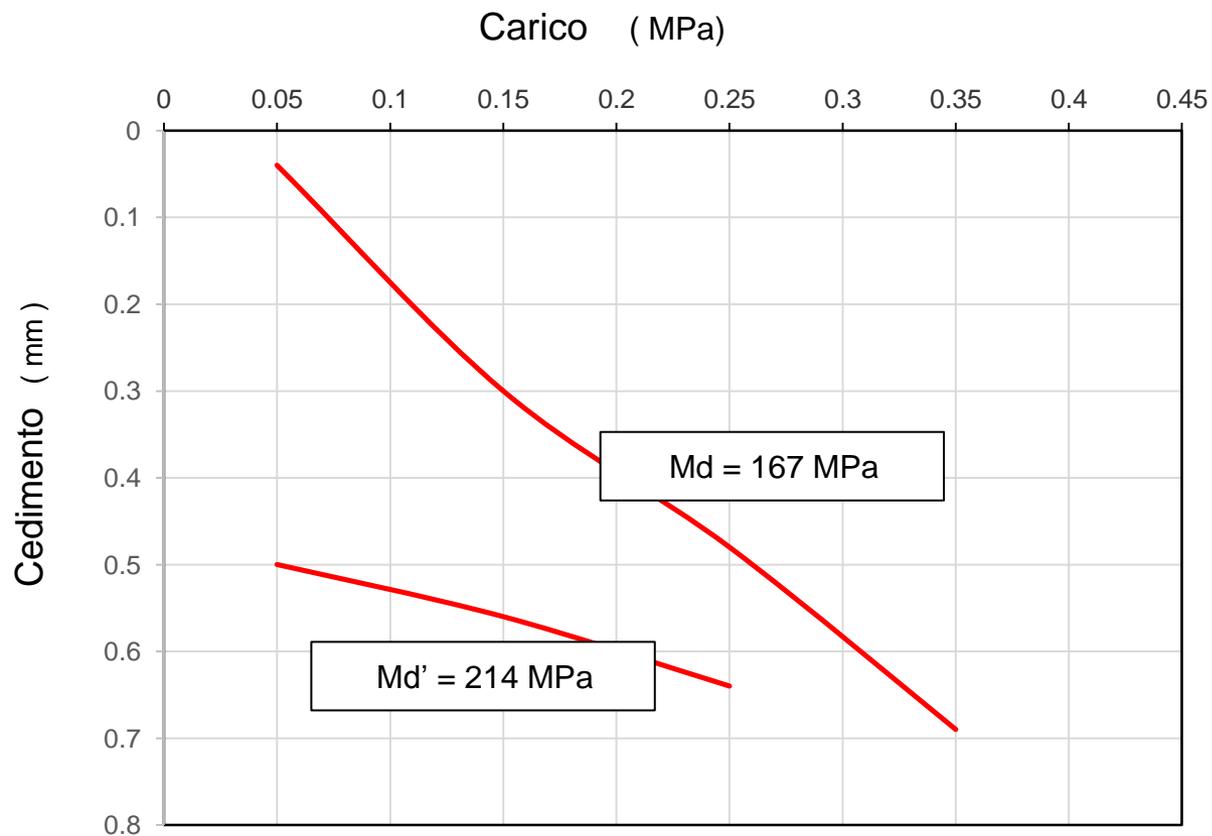
(CNR BU n.146)



$M_d \geq 80 \text{ MPa}$

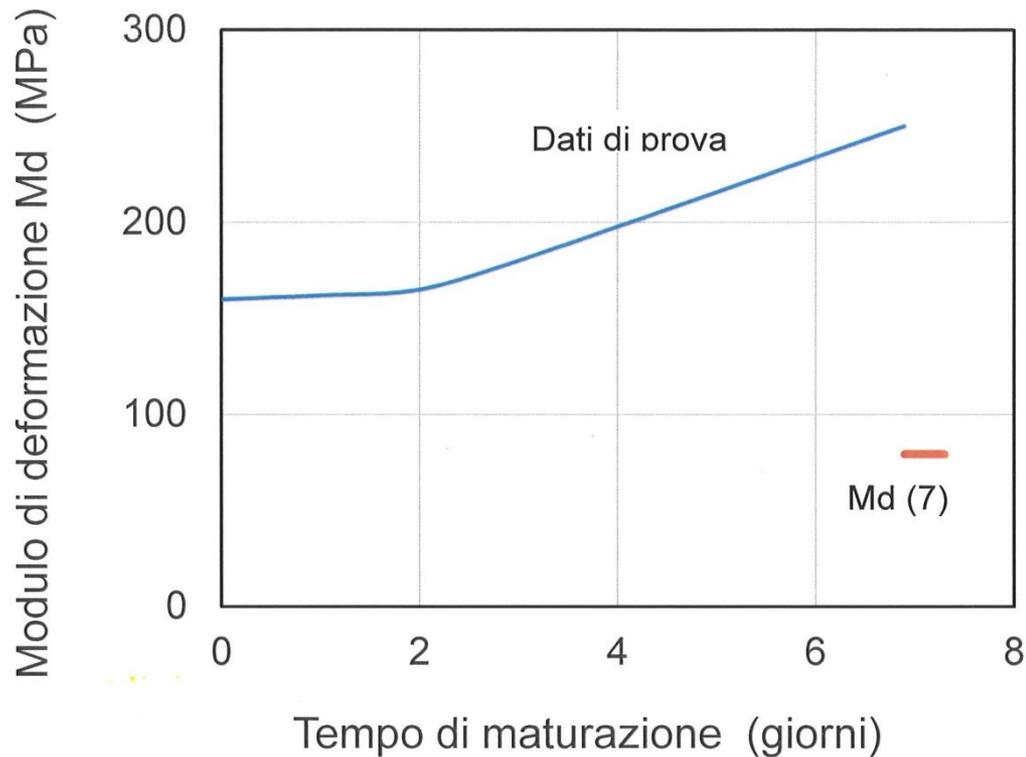
Dato di capitolato

Prova di carico su piastra (CNR BU n.146)



Prova di carico su piastra

(CNR BU n.146)



Campionamento dei provini



la fustella deve essere infissa nel terreno immediatamente dopo la
compattazione

Campione monolitico



un campione è definito **monolitico** se :

- a. ha un rapporto $V/A > 0,67$ cm
- b. ha dimensioni $>$ di 4 cm
- c. non è frantumabile per compressione manuale
- d. alla fine della prova di eluizione (48 h) è rimasto integro

Prove dopo il trattamento di inertizzazione

la prova si basa sull'assunzione che il rilascio dal monolite avviene dall'area della superficie esposta; ne consegue che il campione deve essere poco permeabile (meglio se impermeabile) e che la compattazione sia stata eseguita correttamente



diametro 10,0 cm - altezza 5 cm
 $V/A = 1,25$ cm



diametro 8,6 cm - altezza 5 cm
 $V/A = 1,15$ cm

i provini monolitici devono essere confezionati subito dopo l'estrazione dalla fustella



Analisi chimiche eseguite sul terreno inertizzato



Posizione	Parametro	Test di cessione iniziale (*)	Limite Max	Test di cessione finale (**)
1	Rame Cu (mg/L)	0,032	0,05	0,012
2	Zinco Zn (mg/L)	0,3	3	0,1
3	Berillio Be (µg/L)	1	10	0,5
4	Cobalto Co (µg/L)	25	250	15
5	Nichel Ni (µg/L)	8	10	1,4
6	Vanadio V (µg/L)	45	250	20
7	Arsenico As (µg/L)	170,9	50	9,7
8	Cadmio Cd (µg/L)	0,5	5	0,2
9	Cromo totale Cr (µg/L)	23,9	50	4
10	Piombo Pb(µg/L)	317,5	50	3
11	Selenio Se (µg/L)	10,6	10	9,2
12	Mercurio Hg (µg/L)	0,58	1	0,13

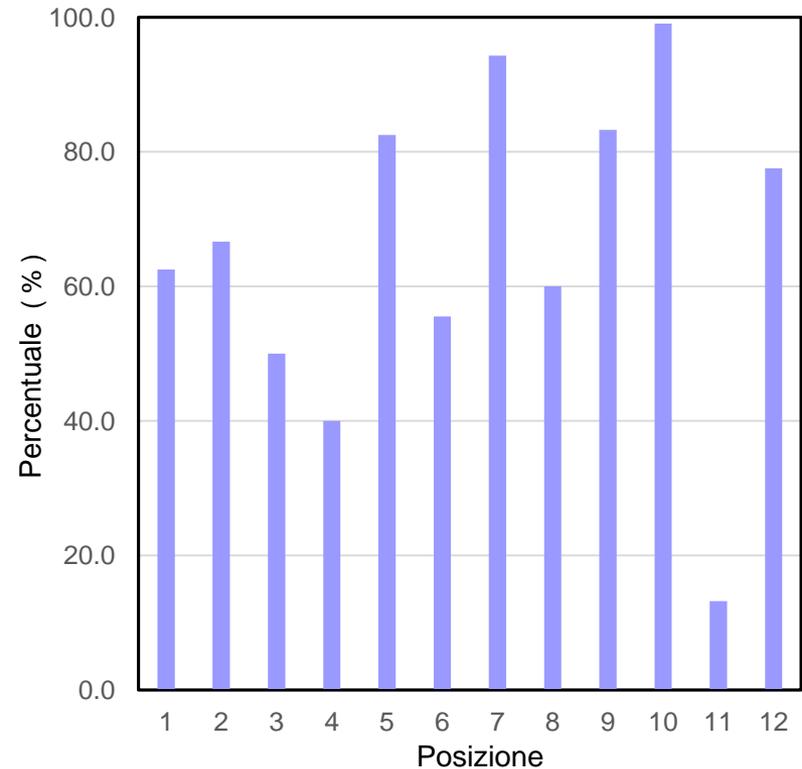
(*) media di 100 prove

(**) media di 80 prove

Percentuale di riduzione



Posizione	Parametro	Riduzione (%)
1	Rame Cu (mg/L)	62
2	Zinco Zn (mg/L)	67
3	Berillio Be ($\mu\text{g/L}$)	50
4	Cobalto Co ($\mu\text{g/L}$)	40
5	Nichel Ni ($\mu\text{g/L}$)	82
6	Vanadio V ($\mu\text{g/L}$)	56
7	Arsenico As ($\mu\text{g/L}$)	94
8	Cadmio Cd ($\mu\text{g/L}$)	60
9	Cromo totale Cr ($\mu\text{g/L}$)	83
10	Piombo Pb ($\mu\text{g/L}$)	99
11	Selenio Se ($\mu\text{g/L}$)	13
12	Mercurio Hg ($\mu\text{g/L}$)	78



Considerazioni finali



- i risultati ottenuti dai test di cessione eseguiti sui provini prelevati dal campo prova sono stati soddisfacenti per cui si è deciso di procedere alla bonifica mediante l'**inertizzazione dei terreni contaminati con un legante composto dal 2% di CaO ed il 3% di cemento Portland 32,5**
- visto i risultati ottenuti i terreni bonificati sono stati riutilizzati per lavori eseguiti in cantiere