

Articolo 2 STABILIZZAZIONE A CALCE DEI SOTTOFONDI

La tecnica consiste nello spandimento della calce sulla superficie di terreno da trattare e nella successiva miscelazione mediante l'ausilio di idonee macchine stabilizzatrici (pulvimixer). Lo scopo è quello di ottenere un miglioramento significativo, in genere a medio e/o a lungo termine, delle proprietà fisico – meccaniche della terra che la rendono stabile alle azioni dell'acqua e del gelo.

A) MATERIALI COSTITUENTI E LORO QUALIFICAZIONE

1) Calce

1.1) Generalità e provenienza

Per il trattamento può essere impiegata calce viva¹ o idrata, costituite prevalentemente da ossido o idrossido di calcio (calci calciche). Il tipo di calce da impiegare deve essere scelto in relazione all'umidità del materiale da trattare: per terreni con rilevante presenza d'acqua deve essere utilizzata calce viva. Le calci devono essere ottenute direttamente dal processo di calcinazione di roccia calcarea, non è permesso l'impiego di calci ottenute da materiali di riciclo.

La calce impiegata deve essere prodotta e qualificata in conformità al regolamento UE sui prodotti da costruzione 305/2011/CPR con dichiarazione di prestazione (DoP). Ciascuna fornitura deve essere accompagnata dalla marcatura CE attestante la conformità all'appendice ZA della norma europea armonizzata UNI EN 459-1.

1.2) Requisiti

La calce impiegata deve essere delle classi CL 90 o CL 80.

La calce viva deve soddisfare i requisiti granulometrici aggiuntivi specificati in Tabella A.1. Inoltre la calce viva, sottoposta al test di reattività secondo UNI EN 459-2², deve raggiungere una temperatura di 60°C entro 25 minuti.

Tabella A.1				
Apertura setaccio (mm)	Categoria P1	Categoria P2	Categoria P3	Categoria P4
10	-	100	-	100
5	-	100	100	≥95
2	100	≥95	≥95	-
0,2	≥95	≥70	-	-
0,09	≥85	≥50	≥30	-

Nota: analisi granulometrica eseguita secondo UNI EN 459-2:2010

Il possesso dei requisiti specificati viene verificato dalla Direzione Lavori esaminando gli attestati di conformità CE dei prodotti e le registrazioni del Controllo di Produzione di Fabbrica del Produttore che devono essere consegnate alla Direzione Lavori almeno 15 giorni prima dell'inizio dei lavori.

1.3) Acqua

L'acqua impiegata per la miscelazione e la maturazione non deve influire in modo negativo sulla prestazione delle miscele. L'acqua potabile può essere impiegata senza ulteriori accertamenti.

¹ calce viva in polvere o in sospensione acquosa. In quest'ultimo caso la sospensione deve contenere almeno il 70% in peso di ossido di calcio.

²Nel caso in cui la calce viva contenga una frazione granulometrica trattenuta al setaccio 2mm, tale materiale dovrà essere frantumato fino a dimensioni inferiori a 2mm per essere sottoposta a prova.

Se richiesto dalla Direzione Lavori l'acqua deve essere analizzata e risultare conforme ai requisiti minimi specificati nella norma UNI EN 1008.

1.4) Terra

Il terreno di sottofondo, insieme ad eventuale terra di apporto, può essere trattato con calce quando:

- appartiene alle classi A₆ e A₇ (secondo la normativa UNI 11531-1), alle classi A₂₋₆ e A₂₋₇ con una frazione passante al setaccio 0,4 UNI non inferiore al 35%, alla classe A₅ con I_p>8;
- è caratterizzato da un valore di blu di metilene superiore a 200 (200 cm³ di soluzione 10g/l di blu di metilene per 100 g della frazione di terra passante al setaccio 0,25 mm, secondo Norma UNI EN 933-9).
- presenta un contenuto di materiale organico non superiore al 3%;
- il diametro massimo degli elementi litoidi è inferiore a 60mm.
- presenta una percentuale di solfati (SO₃) non superiore allo 0,3% determinata secondo le norme UNI EN 1744-1 ma utilizzando, per l'estrazione dei solfati dalla terra, un rapporto in peso acqua/terra pari a 10. Con percentuale di solfati compresa tra 0,3% ÷ 0,5% in alcune zone si potrebbero verificare reazioni espansive localizzate, è quindi necessario eseguire la polverizzazione della terra e la miscelazione della calce con estrema attenzione. In particolare durante la miscelazione l'umidità deve essere almeno il 3-5% superiore al valore ottimo risultante dalle prove di costipamento. Deve essere osservato un periodo di maturazione di almeno 3 giorni prima di eseguire una seconda miscelazione e, quindi, la compattazione dello strato. Con percentuale di solfati compresa tra 0,5% ÷ 0,8% oltre alle misure già espresse, deve essere attentamente valutato, in fase di progetto della miscela, il periodo di maturazione. In questa fase va anche considerata l'opportunità di aggiungere la calce in 2 fasi successive. L'accettazione delle miscele è basata principalmente sul valore del rigonfiamento. Con percentuale di solfati superiori allo 0,8 il trattamento con calce deve essere escluso.

1.5) Miscela

La composizione della miscela terra-calce-acqua deve essere stabilita in base ai risultati di uno studio eseguito presso uno dei Laboratori di cui all'art. 59 del DPR n. 380/2001.

1.5.1) Studio della miscela

Per gli interventi di stabilizzazione lo studio deve indagare almeno 3 miscele terra-calce con tenori di calce crescenti a partire dal valore minimo del Contenuto Iniziale di Calce (CIC). Fatte salve le ulteriori prescrizioni che la Direzione Lavori pone nel caso di terreni con medio o elevato contenuto di solfati, lo studio comprende almeno le seguenti prove sul terreno da stabilizzare:

- a) determinazione del Contenuto Iniziale di Calce (CIC), secondo la norma ASTM D6276-99a;
- b) determinazione del Valore di Blu (VB), secondo la norma UNI EN 933-9;
- c) determinazione del limite liquido e del limite plastico (UNI CEN ISO/TS 17892-12);
- d) determinazione della curva di costipamento con energia Proctor Standard (UNI EN 13286-2 in alternativa DIN 18127) con almeno 5 punti di umidità comprendenti il valore dell'umidità naturale della terra in sito;

Sulle miscele terra-calce vengono eseguite le seguenti prove:

- a) determinazione del limite liquido e del limite plastico (UNI CEN ISO/TS 17892-12);
- b) determinazione della curva di costipamento con energia Proctor Standard (UNI EN 13286-2) con almeno 5 punti di umidità comprendenti il valore dell'umidità naturale della terra in sito;
- c) determinazione dell'indice C.B.R. (UNI EN 13286-47:2012) su provini costipati con valori di umidità W_{ott} ed a W_{ott}+3%, maturati per 28 giorni a 20° ± 2° C e U.R.>95%³ e quindi saturati con 4 giorni di immersione in acqua a 20° ± 2° C. Al termine della saturazione viene inoltre determinato il valore di rigonfiamento. Se richiesto dalla D.L. lo studio deve prevedere l'impiego di due provini per ciascun valore di umidità della miscela.
- d) se richiesto dalla Direzione Lavori viene inoltre effettuata la determinazione dell'indice C.B.R. (CNR-UNI 10009) "immediato" su provini costipati con valori di umidità pari a W_{ott} ed a W_{ott}+3% ;
- e) se richiesto dalla Direzione Lavori per la verifica della resistenza al gelo-disgelo deve essere effettuata la determinazione della resistenza a compressione (EN 13286-41) su provini confezionati secondo

³ In alternativa la maturazione potrà essere eseguita per 48h a 49 ± 1°C e U.R.>95%

UNI EN 13286-50 al 98% della densità massima ottenuta dalle prove di costipamento e all'umidità attesa durante la fase di costipamento in sito. La maturazione dei provini viene effettuata per 28 giorni a $20^{\circ} \pm 1^{\circ} \text{C}$ e U.R.>95%. Dopo la maturazione i provini sono sottoposti a 13 cicli gelo-disgelo (16 ore a -5°C , 8 ore a 8°C). Se richiesto dalla Direzione Lavori studio deve prevedere l'impiego di due provini per ogni prova.

La preparazione delle miscele deve avvenire essiccando preliminarmente la terra fino a massa costante, ad una temperatura non superiore a 60°C . Si procede quindi all'aggiunta della calce nelle percentuali in studio. Queste ultime saranno sempre riferite al peso secco della terra. Si procede quindi con l'aggiunta delle percentuali d'acqua richieste dallo studio, una delle quali deve coincidere con l'umidità della terra in sito.

L'intervallo di maturazione tra l'aggiunta d'acqua e la compattazione della miscela deve essere stabilito, anche in base alle indicazioni della Direzione Lavori, riguardo alla natura del terreno, al programma delle lavorazioni ed ai controlli in sito.

Le curve di costipamento e le curve CBR devono essere tracciate con riferimento sia alla quantità di acqua aggiunta alla terra essiccata sia all'umidità misurata sulle miscele terra-calce dopo il periodo di maturazione.

B) ACCETTAZIONE DELLA MISCELA

Si ritengono idonee per la formazione di sottofondi le miscele terra-calce che forniscono le seguenti prestazioni:

- a) contenuto iniziale di calce (CIC) $> 1,5\%$;
- b) valore di blu VB $> 2 \text{ g/kg}$;
- c) indice C.B.R. $> 30\%$ (per i provini confezionati con W_{ott} e con $W_{\text{ott}+3\%}$ e quindi sottoposti a maturazione e saturazione);
- d) rigonfiamento dopo 4gg di immersione $< 1,5\%$ (per i provini confezionati con W_{ott} e con $W_{\text{ott}+3\%}$ e quindi sottoposti a maturazione e saturazione);
- e) resistenza a compressione $R_c \geq 1,2 \text{ MPa}$.

L'Appaltatore è tenuto a presentare alla Direzione Lavori, almeno 15 giorni prima dell'inizio della posa in opera i risultati ottenuti dalle prove anzidette e quindi la percentuale di calce che intende adottare. Acquisita l'approvazione della Direzione Lavori, può procedere all'impiego della miscela.

In ogni caso la quantità di calce aggiunta non deve mai essere inferiore al 2,0% in peso, pena la rimozione dell'intero strato di materiale a totale onere e cura dell'Appaltatore.

C) POSA IN OPERA

La superficie dello strato deve essere perfettamente livellata secondo i piani indicati nei disegni di progetto. Se richiesto, si deve effettuare una rullatura della superficie finalizzata all'individuazione di zone particolarmente compressibili. Su indicazione della Direzione Lavori tali zone vengono bonificate prima dell'inizio del trattamento.

L'operazione di miscelazione deve essere preceduta da quella di frantumazione della terra in sito fino alla profondità prevista per la stabilizzazione, ottenuta mediante passate successive con idonea attrezzatura polverizzatrice (pulvimixer) fino ad ottenere grumi di terra della dimensione massima di 40 mm.

La macchina polverizzatrice deve trattare il materiale in modo uniforme fino alla profondità richiesta, per tutta la larghezza della lavorazione. Essa deve inoltre fornire una chiara indicazione visiva della profondità di lavorazione.

Terminata l'operazione si deve determinare l'umidità della terra in sito, procedendo con metodi speditivi, ed eseguendo le verifiche in più punti ed a più profondità.

Sono considerati soddisfacenti valori di umidità compresi tra quello ottimo della miscela, W_{ott} e $W_{\text{ott}+3\%}$. In presenza di valori di umidità troppo elevati si procede, in accordo con la Direzione Lavori ad una nuova lavorazione del materiale. L'aggiunta di calce non può essere fatta se l'umidità della terra non rientra nell'intervallo prescritto. Nei casi in cui i valori di umidità sono sensibilmente più elevati del valore ottimo di costipamento è preferibile l'impiego di calce viva macinata per il suo effetto essiccante.

La stesa della calce viene eseguita mediante impiego di spanditore a dosaggio volumetrico regolato in funzione della velocità di avanzamento, tale da raggiungere la percentuale prevista in sede di progetto della miscela. L'operazione di spandimento viene sospesa quando la presenza di vento non permette di garantire la sicurezza

del personale operante, che deve comunque essere dotato di maschere protettive, e l'esattezza del dosaggio della miscela. Il materiale deve quindi essere umidificato, con le modalità indicate dalla Direzione Lavori, fino a raggiungere il contenuto d'acqua richiesto.

Lo spandimento della calce deve interessare una superficie non superiore a quella che può essere trattata nella stessa giornata lavorativa.

Entro 6 ore dalla stesa della calce si procede alla miscelazione che deve essere realizzata con 2 o più passate di miscelatore (pulvimixer). Il miscelatore deve essere del tipo a rotore, semovente e permettere di lavorare fino alla profondità di 50 cm.

Il controllo della profondità e dell'uniformità del trattamento viene eseguito durante le operazioni di miscelazione attraverso la verifica visiva dell'apparecchiatura di miscelazione. Inoltre il controllo può essere eseguito attraverso trincee di ispezione, impiegando il metodo della fenolftaleina⁴.

La miscelazione deve garantire che le zolle siano ridotte a dimensioni tali per cui la terra passi interamente al setaccio da 31,5 mm e per almeno il 50% al setaccio da 4mm.

Se richiesto dalla Direzione Lavori, riguardo alla composizione ed alla reattività della terra da trattare, è necessario effettuare una seconda fase di miscelazione (miscelazione finale) dopo un periodo di tempo variabile da 1 a 7 giorni dalla prima miscelazione. Tale periodo di maturazione viene stabilito dalla Direzione Lavori sulla base dei risultati degli studi di qualifica del materiale.

Le modalità operative indicate e le macchine impiegate comportano la creazione di giunti trasversali e longitudinali. I giunti longitudinali ottenuti dalla lavorazione di strisce contigue devono risultare sovrapposti per almeno 15 cm. Inoltre nella stessa giornata lavorativa i tratti su cui si è operato devono essere completati per tutta la larghezza prevista in progetto.

Nei giunti di lavoro trasversali, perpendicolari all'asse del tracciato, la miscela già costipata va ripresa in tutte quelle zone nelle quali il contenuto di calce, lo spessore, o il grado di compattazione risultino inadeguati e/o disomogenei. Le riprese devono essere eseguite all'inizio della successiva giornata lavorativa, nello strato indurito.

Si passa quindi alla rullatura da eseguire, secondo le caratteristiche geotecniche della miscela terra calce, con rulli a piedi costipanti, segmentati, vibranti, gommati.

La finitura superficiale deve avvenire con l'impiego di macchine livellatrici e non con l'apporto di nuovo materiale. La superficie finita dello strato in terra stabilizzata deve avere la sagoma e le quote riportate nei disegni di progetto.

Una volta ultimate le operazioni di costipamento e finitura, il materiale trattato deve essere protetto mediante la spruzzatura di emulsione bituminosa a lenta rottura (designazione secondo UNI EN 13808: C55B4), con un dosaggio di 1,0 - 1,5 kg/m² in relazione alla porosità superficiale e alla capacità di assorbimento della parte superiore dello strato trattato. L'emulsione deve essere coperta con sabbia o graniglia per evitarne l'asportazione da parte dei mezzi di cantiere. Il velo di protezione con emulsione bituminosa può essere evitato se lo strato trattato a calce viene ricoperto da uno strato sovrastante in tempi brevi. In questo caso, in attesa del ricoprimento, il materiale trattato a calce deve essere mantenuto sempre umido, con almeno tre irrorazioni di acqua al giorno, fino alla realizzazione dello strato sovrastante.

D) CONTROLLI

Il controllo della qualità della stabilizzazione a calce deve essere eseguito mediante prove di laboratorio sui materiali costituenti, sulla miscela e con prove in situ.

L'ubicazione dei prelievi e la frequenza delle prove sono indicate nella **Tabella D.1**.

Le prove saranno eseguite dal Laboratorio della Provincia Autonoma di Bolzano o da altro Laboratorio indicato dal Committente.

A compattazione ultimata la **densità** del secco in situ (γ_s), nel 95% dei prelievi, non deve essere inferiore al 98% del valore di riferimento ($\gamma_{s,max}$) misurato in laboratorio sulla miscela di progetto con energia di costipamento Proctor Standard (UNI EN 13286-2) e dichiarato prima dell'inizio dei lavori. Le misure della densità sono effettuate secondo la norma (DIN 18125-2 ovvero CNR 22/72, ASTM D 1556-90).

⁴Viene aperta una piccola trincea larga almeno 30cm per tutto lo spessore dello strato trattato. Sulle pareti dello scavo viene spruzzata una soluzione di fenolftaleina ed alcool. Il viraggio al viola del colore indica la superficie trattata a calce, da cui è possibile ricavare la profondità dell'intervento.

Per valori di densità inferiori a quello previsto viene applicata, per tutto il tratto omogeneo a cui il valore si riferisce, una detrazione pari a:

$$\% \text{ di detrazione} = 2 (s - 2)^2$$

dove s è lo scostamento percentuale della densità in sito (γ_s) rispetto a quella di laboratorio ($\gamma_{s \text{ ottimo}}$) valutato con:

$$s = 100 (0,98\gamma_{s \text{ ottimo}} - \gamma_s) / 0,98\gamma_{s \text{ ottimo}}$$

Valori della densità del secco inferiori al 98% del valore di riferimento ($\gamma_{s,max}$) misurato in laboratorio sulla miscela di progetto con energia di costipamento Proctor Standard (UNI EN 13286-2, DIN 18127) comporteranno la ripetizione del trattamento a spese dell'Impresa, salvo il danno per il mancato esercizio dell'infrastruttura.

Le prove di controllo della **portanza** devono essere effettuate con prove di carico su piastra da 300 mm secondo la DIN 18134. Possono inoltre essere impiegate prove rapide e/o ad alto rendimento come ad esempio la piastra dinamica leggera LFWD.

Il Modulo di deformazione E_{v2} deve essere non inferiore a 120 MPa con rapporto E_{v2}/E_{v1} inferiore a 2,15. Quando il valore di E_{v2} risulta maggiore di 200 MPa, il rapporto E_{v2}/E_{v1} non è rilevante.

Per valori medi di portanza inferiori a quello previsto viene applicata, per tutto il tratto omogeneo a cui il valore si riferisce, una detrazione pari a:

$$\% \text{ di detrazione} = [(120 - E_{v2})/5]^2$$

Valori del modulo E_{v2} inferiori a 100 MPa e/o del rapporto E_{v2}/E_{v1} superiori a 2,15 (solo per E_{v2} inferiore a 200 MPa) comporteranno la ripetizione del trattamento a spese dell'Impresa, salvo il danno per il mancato esercizio dell'infrastruttura.

Quando è previsto l'impiego di prove rapide o ad alto rendimento i livelli prestazionali minimi devono essere stabiliti sperimentalmente nel corso del campo prove o sul materiale posto in opera, prima dell'inizio dei controlli finali. Per le prove rapide di portanza con piastra dinamica leggera LFWD, viene individuata una correlazione tra il Modulo dinamico E_{vd} ed il modulo E_{v2} ottenuto da prove di tipo statico. L'accettabilità del materiale viene valutata sulla base dei valori E_{v2} ricavati da tale correlazione.

La Direzione Lavori può inoltre richiedere prove dell'indice C.B.R., prove di rigonfiamento e prove di rottura a compressione su provini prelevati in sito costituiti da materiale già compattato.

Per eventuali valori inferiori al 90% di quelli ottenuti in laboratorio sulla miscela di progetto la Direzione Lavori valuta l'accettabilità del trattamento e le detrazioni da applicare.

Tabella D.1

CONTROLLO DEI MATERIALI E VERIFICA PRESTAZIONALE			
TIPO DI CAMPIONE	UBICAZIONE PRELIEVO	FREQUENZA PROVE	REQUISITI RICHIESTI
Miscela sfusa già compattata	Fascia di stesa ultimata	ogni 2000 m ³ di materiale lavorato	indice CBR, rigonfiamento e resistenza a rottura (prove a compressione) non inferiori al 90% di quelli ottenuti in laboratorio sulla miscela di progetto
Strato finito	Fascia di stesa ultimata	Ogni 250 m di fascia di stesa	densità in sito non inferiore al 98 % della densità di laboratorio con metodo Proctor Standard.
Strato finito	Fascia di stesa ultimata	Ogni 250 m di fascia di stesa	modulo di deformazione E_{v2} , determinato con prove di carico su piastra da 300 mm secondo la DIN 18134, non inferiori a 120 MPa con rapporto $E_{v2}/E_{v1} \leq 2,15$