



# Anas SpA

Direzione Centrale Progettazione

CUP F2602000340001 CIG 652449686B



**GARA CA 08/15 - NUOVA SS 554 CAGLIARITANA**  
ADEGUAMENTO DELL'ASSE ATTREZZATO URBANO ED ELIMINAZIONE  
DELLE INTERSEZIONI A RASO DAL KM 1+500 AL KM 11+850

## PROGETTO DEFINITIVO

### ASSE STRADALE PRINCIPALE

### CANTIERIZZAZIONE

### PIANO DI GESTIONE MATERIE

Interventi di Stabilizzazione a calce - Relazione Tecnica

CODICE PROGETTO			CODICE ELABORATO					SCALA	DATA
progetto	liv.	numero	campo 1	campo 2	campo 3	campo 4	rev		
D P C A 0 6	D	1 5 0 1	T 0 0	C A 0 6	C A N	R E 0 4	A	-	30/11/2019

CONCORRENTE:



PROGETTISTA INDICATO COSTITUENDO R.T.P.

Capogruppo Mandataria R.T.P.

**SWS**<sup>TM</sup>

Mandante



Mandante

ING. FRANCESCA LEO

RESPONSABILE DELL'INTEGRAZIONE  
FRA LE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Paolo Cucino

RESPONSABILE ELABORATO

Ing. Paolo Cucino

## INDICE

1	PREMESSA .....	3
1.1	Descrizione delle opere in progetto .....	3
1.2	Oggetto specifico del documento .....	3
2	NORMATIVE .....	5
3	IL TRATTAMENTO DI STABILIZZAZIONE A CALCE PER SOTTOFONDI E RILEVATI .....	6
3.1	Generalità .....	6
3.2	Condizioni necessarie per la stabilizzazione a calce .....	6
3.3	Caratteristiche del trattamento .....	6
3.4	Prestazioni e parametri geotecnici di riferimento .....	7
3.5	Descrizione della procedura operativa per la definizione del contenuto di calce di progetto .....	10
4	PROCEDURE OPERATIVE PER IL TRATTAMENTO A CALCE .....	12
4.1	Fase preliminare – verifica e necessita del trattamento di stabilizzazione .....	12
4.2	Fase costruttiva, tecnologie e controlli sui materiali .....	13
4.3	Fase costruttiva: controlli, mitigazioni ambientali e monitoraggio .....	15
4.4	Misure per la mitigazione degli effetti sulla qualità dell'aria .....	16
4.4.1	Preparazione e stesa del terreno naturale .....	16
4.4.2	Stesa della calce .....	17
4.4.3	Prima fresatura di miscelamento terra calce .....	17
4.4.4	Seconda e terza fresatura per riduzione granulometrica .....	18
4.4.5	Profilamento rilevato, rullatura e compattazione .....	18
4.4.6	Misure per la mitigazione degli effetti sulle acque .....	19
4.4.7	• Percolazione delle acque piovane all'interno del corpo del rilevato: .....	19
4.4.8	• Dilavamento della calce: .....	20
4.4.9	• Rilascio accidentale di calce direttamente nei corsi d'acqua principali: .....	20
4.5	Monitoraggio Meteorologico .....	21
4.5.1	Rilievi anemometrici: .....	21
4.5.2	Rilievi pluviometrici: .....	21



## 1 PREMESSA

La presente relazione integra il Piano di Utilizzo redatto per il progetto dell'adeguamento stradale dell'esistente SS 554 "Cagliaritana", che si sviluppa dal km 1+500 allo svincolo per la SS 125 (km 11+850), ad una sezione stradale tipo B extraurbana principale, allo scopo di dare una descrizione tecnica delle modalità di riutilizzo del terreno proveniente dagli scavi per la formazione di rilevati stradali, previa stabilizzazione a calce.

### 1.1 Descrizione delle opere in progetto

L'infrastruttura oggetto del presente Progetto Definitivo, è costituita da un tratto di strada tipo B extraurbana di lunghezza pari a circa 10340 m, che si svilupperà in corrispondenza della attuale sede della SS 554, con direzione Ovest - Est, nella zona a Nord del centro abitato di Cagliari.

Le opere comprese nel Progetto Definitivo sono suddivise, secondo il bando ANAS in due distinti lotti funzionali:

- I° Lotto funzionale (da progr. 1+500 a progr. 7+100): sarà oggetto dell'Appalto di esecuzione e di progettazione esecutiva, da parte dell'aggiudicatario della gara;
- II° Lotto funzionale (da progr. 7+100 a progr. 11+850): non sarà oggetto dell'Appalto di esecuzione e di progettazione esecutiva, ma soltanto della fase di progettazione definitiva in gara.

Il tracciato stradale principale verrà realizzato per adeguamento in sede dell'attuale infrastruttura, con allargamento della sezione stradale esistente SS 554, dalla progressiva iniziale fino alla progressiva 10+500 circa, dove la direzione principale per Villasimius e la Sardegna sud – orientale verrà indirizzata per i rimanenti 1350 m compresi nel lotto, sulla attuale strada statale SS 125, riconfigurando l'ultimo tratto della attuale SS 554 come svincolo in uscita verso la direzione Poetto/Quartu Sant'Elena.

Il progetto comprende anche 8 svincoli principali, con l'eliminazione di tutte le intersezioni a raso esistenti e la realizzazione di svincoli su piani sfalsati, di 9 viabilità di servizio complanari, e di numerosi tratti di adeguamento della viabilità esistente limitrofa.

Sono previste inoltre importanti opere idrauliche a salvaguardia della nuova infrastruttura, quali canali idraulici e sistemi di vasche di laminazione, dimensionati allo scopo di abbattere la pericolosità idraulica, che risulta allo stato attuale molto elevata su lunghi tratti del tracciato principale.

### 1.2 Oggetto specifico del documento

Con riferimento alle normale pratica industriale di "trattamento a calce" prevista nell'ambito del progetto della SS 554, in aderenza a quanto disposto nell'ambito delle Linee guida del Consiglio del SNPA del 09.05.2019, la presente relazione illustra le verifiche preliminari e in corso d'opera (di carattere ambientale e geologico) effettuate e da effettuare sui materiali scavati, le tecnologie costruttive adottate e le modalità di gestione delle operazioni di stabilizzazione previste al fine di prevenire eventuali impatti negativi sull'ambiente.

Per come esplicitato nell'ambito della Delibera n. 54/2019 del Consiglio SNPA, "il trattamento a calce potrà essere consentito come normale pratica industriale a condizione che:

- venga verificato, ex ante ed in corso d'opera, il rispetto delle CSC con le modalità degli Allegati 2, 4 ed 8 al D.P.R. 120/207 o dei valori di fondo naturale;
- sia indicata nel Piano di utilizzo l'eventuale necessità del trattamento di stabilizzazione e siano altresì specificati i benefici in termini di prestazioni geo-meccaniche;
- sia esplicitata nel Piano di utilizzo la procedura da osservare per l'esecuzione della stabilizzazione con leganti idraulici (UNI EN 14227-1:2013 e s.m.i.) al fine di garantire il corretto dosaggio del legante idraulico stesso;
- siano descritte le tecniche costruttive adottate e le modalità di gestione delle operazioni di stabilizzazione previste (cfr. Allegato 1 al presente documento) al fine di prevenire eventuali impatti negativi sull'ambiente."

Di seguito vengono evidenziate le verifiche (attuata e disposte dal progettista) e le azioni progettuali programmate in ottemperanza alle condizioni sopra riassunte.

## 2 NORMATIVE

Le principali norme riguardanti le terre e rocce da scavo sono le seguenti:

- D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152 "Norme in materia ambientale" e s.m.i.;
- DM 10 agosto 2012, n. 161 "Regolamento recante la disciplina dell'utilizzazione delle terre e rocce da scavo"
- D.P.R. 13 giugno 2017, n. 120 "Regolamento recante la disciplina semplificata della gestione delle terre e rocce da scavo, ai sensi dell'articolo 8 del decreto-legge 12 settembre 2014, n. 133, convertito, con modificazioni, dalla legge 11 novembre 2014, n. 164".

Il recente D.P.R. 13 giugno 2017, n. 120 aggiorna e sostituisce il DM 10 agosto 2012, n. 161, che viene abrogato e resta in vigore solo per quei progetti il cui iter di approvazione era già stato avviato al momento dell'entrata in vigore della nuova norma.

La revisione progettuale in oggetto prevede l'introduzione della possibilità di riutilizzo dei terreni di scavo tramite stabilizzazione a calce, alla luce delle determinazioni riportate nella recentissima Delibera (n. 54/2019) del Sistema Nazionale per la Protezione dell'Ambiente (SNPA) recante "Linee guida sull'applicazione della disciplina per l'utilizzo delle terre e rocce da scavo", con la quale sembrerebbe essere chiarito l'aspetto relativo alla stabilizzazione a calce (o cemento) quale normale pratiche industriali.

## 3 IL TRATTAMENTO DI STABILIZZAZIONE A CALCE PER SOTTOFONDI E RILEVATI

### 3.1 Generalità

Per "terra stabilizzata a calce" si intende una miscela composta da una terra / calce viva (od idrata) ed acqua ("pulvimix"), in quantità tali da modificare le caratteristiche fisico-chimiche e meccaniche della terra, onde ottenere una miscela idonea per la formazione di strati che, dopo costipamento, risultino di adeguata capacità portante nonché stabili all'azione dell'acqua o del gelo.

Detta tecnica, impiegata per la costruzione dei rilevati e dei loro piani di posa ed ampiamente perfezionata e applicata all'estero già negli anni '50, è in grado di assicurare:

- una notevole diminuzione dell'indice di plasticità della terra ( $IP = LL-LP$ ) grazie al sensibile aumento del limite plastico già per aggiunta dell'1-3% in peso di calce rispetto al peso secco della terra trattata; la miscela terra-calce mantiene perciò lo stato solido pur con umidità sensibilmente più elevata rispetto a quella che rende plastica la terra tal quale;
- uno spiccato aumento della lavorabilità della terra miscelata con la calce, con densità secche uguali o superiori al 100% della densità massima secca, riferita al costipamento Proctor Standard, quando si lavorano miscele con umidità di costipamento prossime alla loro umidità ottima;
- il conseguimento di elevati valori di portanza immediata.

E' importante sottolineare come le modifiche della terra trattata con calce continuano nel tempo, migliorando la stabilità e quindi la capacità portante anche dopo 90 giorni, per via innanzitutto della riduzione del contenuto d'acqua e successivamente di reazioni chimiche complesse ("flocculazione delle argille") che danno origine a cristalli di silicati ed alluminati di calcio idrati i quali fungono da cemento fra i granuli di terra.

### 3.2 Condizioni necessarie per la stabilizzazione a calce

Condizione necessaria affinché la stabilizzazione con calce possa essere efficace è che il terreno da trattare sia di tipo limo-argilloso (tipo A5, A6 e A7) ovvero avere Indice di plasticità  $IP > 10$ . Fanno eccezione le terre ghiaiose-argillose qualora presentino una percentuale di materiali fini passanti al setaccio 0,4 mm non  $< 35\%$ .

### 3.3 Caratteristiche del trattamento

Le percentuali di calce che di solito si aggiungono ad un terreno variano, più frequentemente, dal 1.50% al 6% in ragione anche del contenuto di acqua al quale si opera la miscelazione, ma anche in relazione al tipo di calce che si intende utilizzare.

Le specifiche tecniche RFI prevedono che il valore % della calce da impiegare non dovrà mai essere inferiore al 2% del peso del secco del terreno.

### 3.4 Prestazioni e parametri geotecnici di riferimento

A titolo indicativo si richiamano alcune esperienze nell'ambito del trattamento a calce

- G. Tesoriere «Strade, ferrovie, aeroporti» Volume 2.

Prove di laboratorio nel corso delle quali la rottura a compressione semplice di provini di terreno argilloso molto plastico (IP = 37) trattati con il 5% di calce idrata:

circa 1.7 MPa a 7 gg;

circa 2.6 MPa a 28 gg;

circa 4.8 MPa a 90 gg;

- RFI – Linea Pontremolese (AGI- Atti Convegno "La Stabilizzazione a Calce dei Terreni", 2012, Napoli)

Il grafico sottostante riporta valori di resistenza a compressione monoassiale in generale superiori a 1 MPa a 28gg, sviluppando in particolare una resistenza significativa nel brevissimo termine

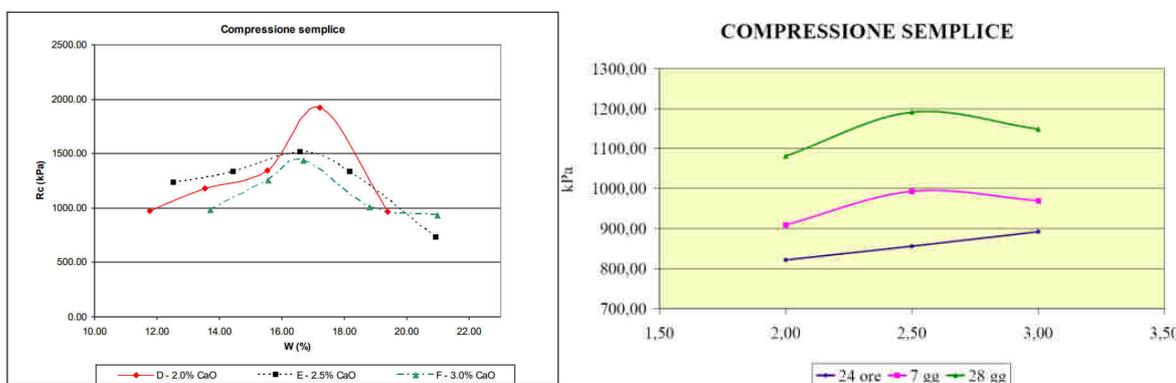


Figura 1 - Linea Pontremolese –Risultati studio delle miscele. Compressione semplice (Ciufegni, 2012)

In termini di rigidezza in fase di costruzione, risulta visibile dalle figure seguenti come i valori risultino significativamente elevati e come si sviluppino rapidamente nel tempo.

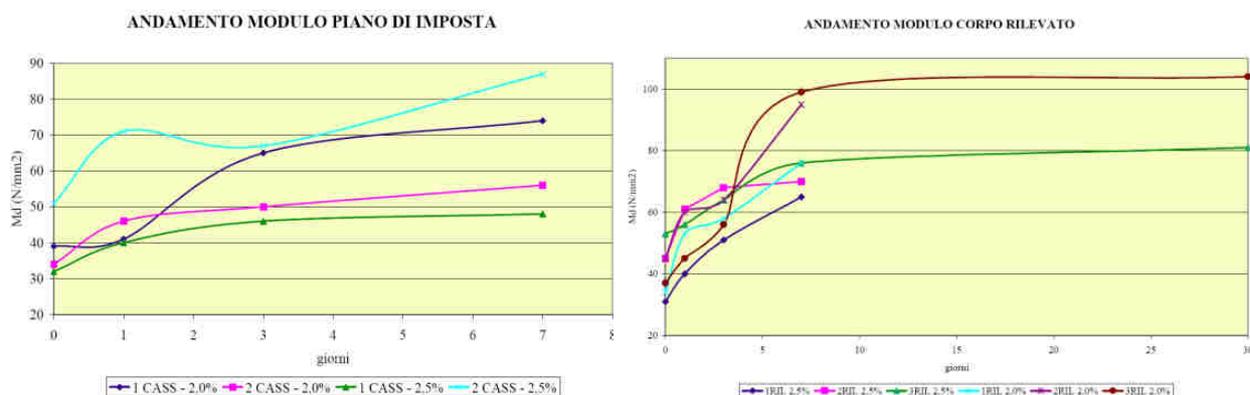


Figura 2 - Linea Pontremolese –Risultati test in sito. Rigidzze (Ciufegni, 2012)

I risultati ottenuti per gli strati di bonifica in termini di rigidezza e densità in sito

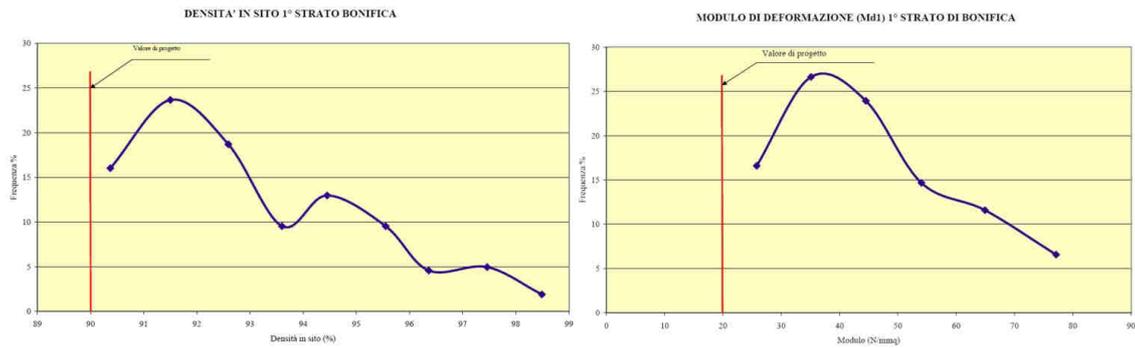


Figura 3 - Linea Pontremolese –Risultati test in sito. Primo strato di bonifica. Rigidezze e densità (Ciufegni, 2012)

- Rilevato Autostradale Poggiolino (G. RUSSO- Parametri di trattamento ed efficacia della stabilizzazione a calce, 2012)

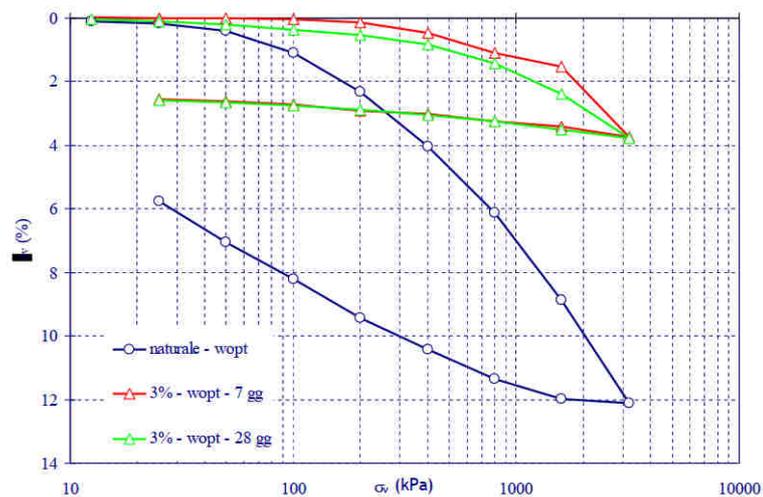


Figura 4 - Linea Pontremolese –Risultati test laboratorio. Deformabilità da prova edometrica su campioni 3% in peso di calce viva nel confronto con il materiale naturale (Russo, 2012)

Effetti riduzione del rigonfiamento: le reazioni chimiche innescate dalla presenza della calce permettono la mitigazione dei fenomeni di rigonfiamento

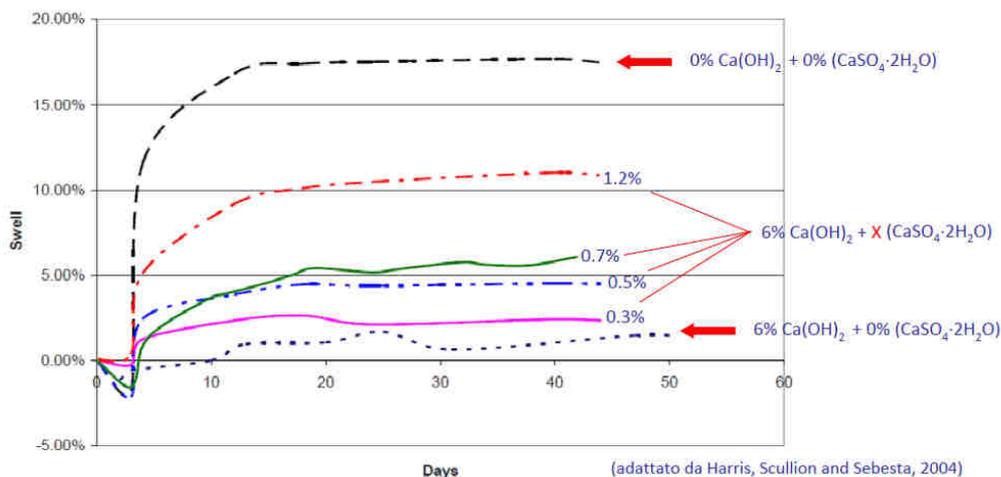


Figura 5 - Risultati test laboratorio. Prove rigonfiamento su materiali naturali rigonfianti e materiali trattati a calce (AGI, 2012)

- linea ferroviaria Fiumetorto-Cefalù Ogliastrillo.

Le figure seguenti riportano i risultati della campagna di prova di laboratorio e prove in sito per i rilevati stabilizzati a calce.

Campione	Costipamento AASHTO Standard		CBR immediata	CBR		Resistenza a compressione ELL	
	$G_{opt}$	$W_{opt}$		CBR <sub>4l</sub>	CBR <sub>7+4l</sub>	1 [gg]	7 [gg]
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]		[MPa]	[MPa]
Miscela tal quale	1671	15,2	5	2	-	0,17	-
Miscela + 2,0% Calce	1655	16,4	17	-	24	0,28	0,74
Miscela + 2,5% Calce	1648	17,0	22	-	35	0,28	0,81
Miscela + 3,0% Calce	1638	17,4	19	-	46	0,28	0,87

Figura 6 - Quadro riepilogativo prove geotecniche su miscele a diverse percentuali di calce su provini costipati con energia AASHTO standard (Venturi et. Al, 2014)

Campione	Costipamento AASHTO Modificato		CBR immediata	CBR		Resistenza a compressione ELL	
	$G_{opt}$	$W_{opt}$		CBR <sub>4l</sub>	CBR <sub>7+4l</sub>	1 [gg]	7 [gg]
	[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]		[MPa]	[MPa]
Miscela + 2,0% Calce	1800	12,0	68	-	49	0,85	0,94
Miscela + 2,5% Calce	1796	12,5	104	-	76	0,68	0,76

Figura 7 - Quadro riepilogativo prove geotecniche su miscele a diverse percentuali di calce su provini costipati con energia AASHTO modificato (Venturi et. Al, 2014)

		Prova di carico su piastra		Prova n°	Densità in situ			CBR in situ
		M <sub>d</sub>	[MPa]		γ <sub>d</sub>	Grado costip.	W <sub>n</sub>	
					[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	
10-02-2010	Tempo 0	28,8		D3	1.884	105	11,3	-
11-02-2010	24 ore	41,7		D13	1.891	105	10,9	-
13-02-2010	3 giorni	48,4		D23	1.873	104	11	-
17-02-2010	7 giorni	71,4		D33	1.779	99	11,8	77

Figura 8 - Quadro riassuntivo prove geotecniche in situ per uno dei punti del campo prova al 2,0% di calce in funzione del tempo (Venturi et. Al, 2014)

		Prova di carico su piastra		Prova n°	Densità in situ			CBR in situ
		M <sub>d</sub>	[MPa]		γ <sub>d</sub>	Grado costip.	W <sub>n</sub>	
					[kg/m <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	
11-02-2010	24 ore	21,7		D20	2.223	124	8,7	-
13-02-2010	3 giorni	52,6		D30	2.034	113	9,8	-
17-02-2010	7 giorni	71,4		D40	2.069	115	9,8	44

Figura 9 - Quadro riassuntivo prove geotecniche in situ per uno dei punti del campo prova al 2,5% di calce in funzione del tempo (Venturi et. Al, 2014)

- Strada Statale 554 – Lotto 2 – Realizzazione N. 3 rotonde, sistemazione asse stradale e connessa viabilità complementare in territorio di Quartu Sant'Elena.

Nell'ambito di tale attività, granulometrico e determinati gli indici di consistenza ("Limiti di Atterberg"), stante la sostanziale omogeneità del substrato, due dei campioni già sottoposti a prova CBR sono stati trattati con calce nella misura del 3% e 4% per poter valutare l'incremento di CBR indotto e conseguentemente della capacità portante del sottofondo. Già nei riscontri a breve termine i moduli (Md) equivalenti risultano pari a di 39 MPa e 26 MPa, che risultano pari a 4÷18 volte superiori a quelli iniziali e ampiamente soddisfacenti i requisiti richiesti.

### 3.5 Descrizione della procedura operativa per la definizione del contenuto di calce di progetto

La procedura operativa prevedrà:

- La valutazione della presenza delle condizioni necessarie per effettuare il trattamento a calce. Per il caso in esame la verifica è stata condotta sulla base delle indagini geognostiche effettuate (pozzetti esplorativi). Qualora le condizioni geotecniche (litofacies di riferimento) risultassero differire da quelle riconosciute lungo le tratte di produzione/scavo lungo le quali si prevede il trattamento di stabilizzazione, sarà effettuata la verifica della condizione necessaria sopra riportata;
- La caratterizzazione del materiale originario per ciascun sito rappresentativo omogeneo, comprendente:
  - i) determinazione dei limiti di Atterberg;
  - ii) analisi granulometrica per via umida con setacci e con aerometro;
  - iii) determinazione del contenuto in sostanze organiche;

- iv) determinazione del contenuto in solfati;

Una volta comprovata l'attitudine alla stabilizzazione a calce/cemento del materiale inerte, nonché l'idoneità ambientale, viene predisposto lo studio della specifica miscela necessaria al miglioramento delle prestazioni geomeccaniche dei principali litotipi interessati.

- Individuazione della tipologia di prodotto da utilizzare come legante, che dovrà essere mantenuto per tutte le fasi successive di laboratorio e costruzione in sito;
  - La determinazione del consumo iniziale di calce (CIC), ovvero della quantità di calce necessaria per soddisfare le reazioni immediate terra-calce, in relazione alla capacità di scambio cationico dei minerali d'argilla. Il valore CIC, determinato secondo norma ASTM C977-92, deve essere maggiore dell'1,5% come verifica di idoneità.
  - Sono previste n. 3 determinazioni per ogni litotipo.
  - La preparazione di n. 3 miscele con quantità crescenti di calce in percentuale rispetto al peso del materiale da miscelare (materiale origine), per un totale di n. 3 miscele per litotipo (CIC; CIC+0.5%; CIC+1.0%)
  - Definizione dello studio di laboratorio delle miscele terre-calce. Sono predisposti campioni di prova adeguatamente compattati secondo l'umidità ottimale (AASHTO Mod) tali da raggiungere un grado di compattazione minimo pari al 95% di quella massima
- i) Limiti di Atterberg, Analisi granulometrica, Classificazione CNR-UNI 10006
  - ii) prova di costipamento AASHTO Modificata;
  - iii) CBR su campioni non imbibiti
  - iv) CBR su campioni dopo 4 giorni di imbibizione e 7 di stagionatura

La miscela acqua-calce-terra ottenuta sperimentalmente in laboratorio e validata dal campo prova su scala reale consentirà il raggiungimento delle prestazioni geomeccaniche necessarie all'impiego del materiale da scavo per la realizzazione dei rilevati stradali previsti in progetto

## 4 PROCEDURE OPERATIVE PER IL TRATTAMENTO A CALCE

### 4.1 Fase preliminare – verifica e necessita del trattamento di stabilizzazione

Con riferimento alla verifica del rispetto delle CSC si richiamano di seguito i contenuti già esplicitati nella relazione tecnica “Piano di Utilizzo” (cod DPCA06-D-1501-T00-CA-06-CAN-RE-02-E) a cui si rimanda integralmente.

Nel dettaglio nella stessa relazione “Piano di Utilizzo Terre” e nei relativi allegati viene riportata la caratterizzazione chimico fisica dei materiali da scavare e vengono inoltre descritte le specifiche di verifica relative alle successive fasi di indagine ambientale disposte dal progettista in aderenza ai contenuti del DPR 120-17.

Si rimanda pertanto ai paragrafi 3.3 del Piano di Utilizzo Terre “caratterizzazione ambientale delle terre e rocce da scavo” e ai sotto-paragrafi 3.3.1 “Analisi ambientali effettuate in sede di Progetto Preliminare”, 3.3.2 “Analisi ambientali effettuate in sede di Progetto Definitivo” e 3.4 “Indagini ambientali integrative” e 3.4.1 “Indagini ambientali in corso d’opera”.

Appurata l'idoneità ambientale del materiale mediante le prove di caratterizzazione ambientale (D.Lgs 152/06 Parte IV Titolo V All.5 Tab.1) vengono esaminate le caratteristiche geotecniche dello stesso al fine di confermarne, anche dal punto di vista fisico, l'idoneità del trattamento.

In fase di progetto preliminare e definitivo sono state già valutate le caratteristiche litologiche dei materiali coinvolti dalle operazioni di scavo provvedendo alla classificazione secondo la CNR-UNI 10006. Si rimanda per completezza di trattazione al paragrafo 3.1 del documento Piano di Utilizzo delle Terre “caratterizzazione geotecnica e chimico fisica dei materiali provenienti dagli scavi – analisi litologica”.

Le opere previste in progetto risultano interagire, alle profondità di scavo di progetto, con l'unità di copertura dei depositi alluvionali terrazzati che affiora in asse tracciato con continuità da inizio tracciato fino alla pk 11+500 con potenza, generalmente, pari a 10 m. Le analisi effettuate mostrano che i depositi alluvionali terrazzati sono classificabili come terre limo-argillose appartenenti ai gruppi A6 e A7 e pertanto idonee all'utilizzo per la costruzione del corpo dei rilevati solo previo trattamento di stabilizzazione a calce.

In sede di cantierizzazione e accesso alle aree di progetto, con riferimento alle indicazioni presenti in Capitolato (rif 3.2.5.10 – CNT – Rilevati Speciali Sperimentali) verranno inoltre eseguite le prove di seguito indicate:

- Analisi granulometrica
- Classificazione CNR-UNI 10006
- Limiti di Atterberg
- Tenore in sostanze organiche
- Tenore in solfati

Di seguito i riferimenti specifici presenti negli stessi paragrafi di capitolato:

*“Una terra affinché risulti adatta alla stabilizzazione a calce deve essere di tipo limoso argilloso ed avere un indice di plasticità normalmente maggiore o uguale a 10.”*

*“possono essere stabilizzate a calce anche terre ghiaiose-argillose, ghiaioso-limose, sabbioso-limose e sabbioso-argillose (tipo A2-6 e A2-7) qualora presentino una frazione di passante al setaccio 0,4 UNI non inferiore al 35%”*

*“le terre impiegate non devono presentare un contenuto di sostanze organiche superiore al 2%”*

*“le terre impiegate non dovranno avere un contenuto di solfati superiore all’1%”*

Al fine di indagare uniformemente i volumi di materiali trattati verranno prelevati un numero significativo di campioni la cui localizzazione e profondità di prelievo sarà indicata dal progettista in elaborati specifici.

Una volta comprovata l’attitudine alla stabilizzazione a calce/cemento del materiale inerte, nonché l’idoneità ambientale, viene predisposto lo studio della specifica miscela necessaria al miglioramento delle prestazioni geomeccaniche dei principali litotipi interessati.

Per ogni litotipo ritenuto idoneo al trattamento sarà eseguito il seguente set di prove nelle modalità qui descritte:

- Consumo Iniziale di Calce (CIC), (n. 3 determinazioni per ogni litotipo); il consumo iniziale di calce rappresenta la quantità minima necessaria per soddisfare le reazioni immediate terra-calce ed è generalmente funzione della capacità di scambio cationico dei minerali argillosi presenti.
- Preparazione di n. 3 miscele con quantità crescenti di calce in percentuale rispetto al peso del materiale da miscelare (materiale origine), per un totale di n. 3 miscele per litotipo (CIC; CIC+0.5%; CIC+1.0%)
- Ognuna delle miscele sarà quindi oggetto di un “campo sperimentale”. Sono predisposti campioni di prova adeguatamente compattati secondo l’umidità ottimale (AASHTO Mod) tali da raggiungere un grado di compattazione minimo pari al 95% di quella massima. Su tali campioni saranno eseguite le seguenti prove:
  - CBR su campioni non imbibiti
  - CBR su campioni dopo 4 giorni di imbibizione e 7 di stagionatura
  - Limiti di Atterberg, Analisi granulometrica, Classificazione CNR-UNI 10006
  - Prova di taglio diretto su campioni dopo 4 giorni di imbibizione e 7 di stagionatura.

La miscela acqua-calce-terra ottenuta sperimentalmente in laboratorio e validata dal campo prova su scala reale consentirà il raggiungimento delle prestazioni geomeccaniche necessarie all’impiego del materiale da scavo per la realizzazione dei rilevati stradali previsti in progetto.

## 4.2 Fase costruttiva, tecnologie e controlli sui materiali

Prima dell’inizio della lavorazione, anche in funzione dei dati ottenuti degli esiti delle campagne di prove sopra descritte, verrà predisposto, con specifiche indicazioni del progettista, un apposito campo prova (rilevato sperimentale) attraverso cui possa venire implementato e valutato il più efficace processo tecnologico (quantità di calce, n. di passaggi di pulvimixer, n. passate di rullo, ecc.) nelle diverse fasi lavorative.

La verifica alla scala reale su campi prova, ovvero su rilevati sperimentali, consente non solo di validare i risultati sperimentali di laboratorio ma anche di verificare l'idoneità dei mezzi e delle attrezzature e la correttezza delle modalità operative.

Tali fasi vengono di seguito brevemente descritte:

- preparazione del suolo: comprende l'asportazione dello strato più superficiale, con lo scopo di eliminare la vegetazione e la terra più ricca di humus; può inoltre essere necessario scarificare le terra, al fine di togliere gli elementi lapidei di dimensioni eccessive;
- carico e trasporto dal cumulo di stoccaggio verso il costruendo rilevato del materiale da stabilizzare in sito;
- scarico del materiale da stabilizzare in sito;
- determinazione dell'umidità naturale della terra da trattare. La calce sfusa sarà consegnata con automezzi che ne consentano lo scarico pneumatico;
- stesa del legante. Partendo dal dosaggio in percentuale stabilito in laboratorio con riferimento al suolo secco, note la densità secca in sito del suolo e la profondità dello strato dopo trattamento e costipazione, si calcola il dosaggio in kg/m<sup>2</sup>. Il controllo della quantità distribuita è effettuato posizionando un telo quadrato con superficie di 1,0 m<sup>2</sup> sul terreno prima del passaggio della macchina spandi calce e pesando poi la calce su di esso depositata a passaggio avvenuto
- la polverizzazione e la miscelazione devono essere attuate con diverse passate di idoneo macchinario, Pulvimixer. L'eventuale aggiunta di acqua per il raggiungimento dell'umidità ottimale, si effettua contemporaneamente alla miscelazione con pulvimixer.
- lo strato di terra trattata deve essere compattato senza ritardi dopo la miscelazione. La rullatura può essere effettuata con rulli a piede di montone o con rullo ferro gomma. Il peso del rullo dipende dallo spessore da compattare e dalla natura del materiale.
- Al termine dei lavori precedenti, qualora la superficie dello strato si mostri irregolare, si procederà a un livellamento con grader o altra macchina adatta allo scopo. Al termine di questa operazione sarà necessario effettuare un'ulteriore passata con rullo statico.

I mezzi operativi impiegati nelle lavorazioni sopra elencate sono:

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

La normativa di riferimento ed i controlli relativi ai materiali sono fissati nelle specifiche di capitolato relative ai rilevati a cui si rimanda. Per quanto riguarda le caratteristiche e l'idoneità dei materiali da trattare si rimanda ai paragrafi 3.2.6.3.1 "Prove di Laboratorio", 3.2.6.3.2 "Prove in sito" e 3.2.6.3.3 "Prove di controllo sul piano di posa".

Durante i lavori verranno effettuati dei controlli in corso d'opera:

- o quantitativo di legante erogato dalla macchina spandicalce
- o determinazione del peso di volume del terreno in sito, mediante un comune volumometro a sabbia
- o prove di carico su piastra

### **4.3 Fase costruttiva: controlli, mitigazioni ambientali e monitoraggio**

Nel presente paragrafo sono descritte le modalità di gestione delle operazioni di stabilizzazione finalizzate alla prevenzione e mitigazione degli effetti sulla qualità dell'aria e delle acque.

Vengono inoltre indicate le specifiche relative al monitoraggio

Per gli effetti sulla qualità dell'aria vengono fornite le indicazioni per le modalità realizzative delle singole fasi in funzione delle condizioni meteorologiche in linea con le misure più severe previste da "Traitement des sol a la chaux et/ou aux liants hydrauliques" edito dal Ministero dei Trasporti Francese.

In relazione alle acque si possono individuare due potenziali fattori di impatto: il dilavamento delle scarpate del rilevato in fase di costruzione, con il trascinarsi della calce non trattata all'interno del reticolo idrografico superficiale, e il rilascio accidentale di calce direttamente nei corsi d'acqua principali.

Data l'importanza delle condizioni meteorologiche ai fini della messa in opera delle corrette procedure operative, occorre prevedere il monitoraggio meteorologico, che riguarda sia gli aspetti anemometrici sia quelli pluviometrici.

È opportuno prevedere l'uso di autobotti per la consegna e lo scarico e lo stoccaggio in appositi silos, dotati di filtro per la captazione della polvere all'atto del loro caricamento.

Il tempo di stoccaggio in cantiere dovrà essere limitato al periodo delle lavorazioni necessarie al trattamento.

La calce in sacchi dovrà essere conservata al coperto, al riparo di umidità, pioggia e ristagni d'acqua, su idonee pedane che la separino dal terreno o su superfici asciutte (cls o conglomerato bituminoso)

Vanno inoltre previste misure di mitigazione necessarie e compatibili con le lavorazioni, quali ad esempio:

- o agglomerare la polvere mediante umidificazione del materiale, movimentazioni con scarse altezze di getto, basse velocità d'uscita e contenitori di raccolta chiusi, trasporto di materiali polverulenti in dispositivi chiusi, etc;
- o per la gestione dei depositi di materiale: adeguamento e incapsulamento degli apparecchi di riempimento e di svuotamento, protezioni dal vento (con umidificazioni con costante bagnatura, pareti, sospensioni lavori per condizioni climatiche avverse), eventuali coperture con stuoie, teli o copertura verde;

- per la circolazione nei cantieri: bagnare costantemente le strade utilizzate, entro 100 m da edifici o fabbricati, limitare la velocità massima sulle piste di cantiere a 30 km/h, lavare i pneumatici di tutti i mezzi in uscita, bagnare e coprire con teloni i materiali trasportati con autocarri;

#### 4.4 Misure per la mitigazione degli effetti sulla qualità dell'aria

Con specifico riferimento alle condizioni anemologiche al verificarsi delle quali occorre interrompere le lavorazioni potenzialmente impattanti, va fissata una soglia pari a 40 km/h (11 m/s come da Linea Guida francese) misurata ad una quota di 1 m dal suolo (altezza alla quale si svolgono le lavorazioni).

Dato un periodo osservazionale di 15' ed una frequenza di campionamento dei dati anemologici di almeno 1 valore ogni 10 s, la sospensione della lavorazione potenzialmente impattante avviene ogni qual volta il valore medio su 15' della velocità del vento risulti superiore a 11 m/s (condizioni anemologiche caratterizzate da vento superiore alla soglia di intervento).

La ripresa della lavorazione interrotta potrà avvenire al ripristino delle condizioni anemologiche ordinarie, vale a dire a seguito di un intervallo osservazionale pari a 15' nel quale si verifichi un valore della media della velocità del vento nuovamente inferiore alla soglia sopra indicata (11 m/s).

Le eventuali sospensioni delle lavorazioni determinate dalle avverse condizioni meteorologiche potranno essere registrate in opportuna documentazione di cantiere.

Vengono di seguito descritte le modalità di gestione delle operazioni di stabilizzazione finalizzate alla prevenzione e mitigazione degli effetti sulla qualità dell'aria e delle acque.

##### 4.4.1 Preparazione e stesa del terreno naturale

###### Condizioni anemologiche ordinarie

Le operazioni vengono condotte per come previsto in progetto.

###### Condizioni anemologiche caratterizzate da vento superiore alla soglia di intervento

Tali condizioni non dettano variazioni o interruzioni della lavorazione in oggetto.

###### Condizioni di pioggia

La pioggia in intensità è definita debole (1-2 mm/h), moderata (3-8 mm/h) e forte (oltre 10 mm/h) secondo il sistema internazionale definito dal World Meteorological Organization.

In caso di pioggia debole (1-2 mm/h) le lavorazioni possono essere continuate in virtù del fatto che la stessa pioggia riduce la necessità di utilizzo di acqua durante le compattazione e l'intensità della stessa non risulta essere determinante per effetti erosivi o di dilavamento.

In caso di pioggia moderata (3-8 mm/h) o forte (oltre 10 mm/h) le lavorazioni in oggetto vanno sospese, e quindi riprese solo dopo l'evento meteorico ed il ristabilirsi nelle condizioni ottimali di umidità del terreno già steso.

#### 4.4.2 Stesa della calce

##### Condizioni anemologiche ordinarie

Le fasi di lavoro vengono condotte per come previsto in progetto.

##### Condizioni anemologiche caratterizzate da vento superiore alla soglia di intervento

Qualora durante le operazioni di stesa di calce si registrino tali condizioni, in considerazione del conservativo limite anemologico e della limitata durata complessiva della fase, viene ultimata la stesa procedendo quindi alla immediata rapida miscelazione tramite fresa dei primi 10 cm di terreno al fine di evitare eventuale spolvero.

La fresatura di soli 10 cm consente una miscelazione più rapida che scongiuri in tempi brevi fenomeni di trasporto aereo della calce stesa, limitando quindi la durata della fase di miscelazione (ed il tempo di latenza della calce stesa) entro i 15 minuti circa.

Le operazioni di stesa della calce potranno riprendere solo al ripristino delle condizioni ordinarie.

Nel caso in cui le operazioni di spandimento vengano sospese, si passerà direttamente alle operazioni di fresatura, secondo le procedure definite.

##### Condizioni di pioggia

In caso di pioggia debole (1-2 mm/h) le lavorazioni possono essere continuate in virtù del fatto che la stessa pioggia riduce la necessità di utilizzo di acqua durante le compattazioni e l'intensità della stessa non risulta essere determinante per effetti erosivi o di dilavamento.

L'attività di stesa della calce non viene invece eseguita in caso di pioggia moderata (3-8 mm/h) o forte (oltre 10 mm/h), al fine di evitare fenomeni di imbibizione e dilavamento del materiale.

Nel caso sopraggiunga pioggia improvvisa (d'intensità da moderata a forte) si procede all'immediata sospensione dei lavori di stesa, alla rapida miscelazione tramite fresa dei primi 10 cm di terreno non ancora miscelato e alla rapida compattazione tramite rullo di tutto il misto terra-calce, per garantire così l'impermeabilità dello strato evitando il dilavamento delle aree interessate dalle lavorazioni.

#### 4.4.3 Prima fresatura di miscelamento terra calce

##### Condizioni anemologiche ordinarie

Le fasi di lavoro vengono condotte per come previsto in progetto.

##### Condizioni anemologiche caratterizzate da vento superiore alla soglia di intervento

Tali condizioni non dettano variazioni o interruzioni della lavorazione in oggetto.

Come già descritto al paragrafo relativo alla stesa della calce, in tali condizioni, a lavorazioni iniziate, si procede alla immediata rapida miscelazione tramite fresa dei primi 10 cm di terreno con calce non ancora miscelata, al fine di evitare eventuale spolvero.

La fresatura di soli 10 cm consente una miscelazione più rapida che scongiuri in tempi brevi fenomeni di trasporto aereo della calce stesa, limitando quindi la durata della fase di miscelazione (ed il tempo di latenza della calce stesa) entro i 15 minuti circa.

Terminata la fresatura di tutta la calce stesa (messa in sicurezza), si procede ad un ulteriore passaggio, al fine di raggiungere l'intero spessore di miscelazione previsto.

#### Condizioni di pioggia

In caso di pioggia debole (1-2 mm/h) le lavorazioni possono essere continuate in virtù del fatto che la stessa pioggia riduce la necessità di utilizzo di acqua durante le compattazione e l'intensità della stessa non risulta essere determinante per effetti erosivi o di dilavamento.

L'attività di prima fresatura non viene invece eseguita in condizioni di pioggia moderata o forte, al fine di evitare fenomeni di imbibizione e dilavamento del materiale. Nel caso sopraggiunga pioggia improvvisa (di intensità da moderata a forte) si procede alla rapida miscelazione tramite fresa dei primi 10 cm di terreno non ancora miscelato, nonché alla rapida compattazione tramite rullo di tutto il misto terra-calce.

#### **4.4.4 Seconda e terza fresatura per riduzione granulometrica**

##### Condizioni anemologiche ordinarie

Le fasi di lavoro vengono condotte per come previsto in progetto.

##### Condizioni anemologiche caratterizzate da vento superiore alla soglia di intervento

Le attività di seconda e terza fresatura non vengono eseguite in tali condizioni di vento.

##### Condizioni di pioggia

In caso di pioggia debole (1-2 mm/h) le lavorazioni possono essere continuate in virtù del fatto che la stessa pioggia riduce la necessità di utilizzo di acqua durante le compattazione e l'intensità della stessa non risulta essere determinante per effetti erosivi o di dilavamento.

L'attività di fresatura per riduzione granulometrica non viene invece eseguita nel caso di condizioni di pioggia moderata o forte, al fine di evitare fenomeni di imbibizione e dilavamento di del materiale.

Nel caso sopraggiunga pioggia improvvisa (d'intensità da moderata a forte) si procede alla rapida compattazione tramite rullo di tutto il misto terra-calce in precedenza miscelato.

#### **4.4.5 Profilamento rilevato, rullatura e compattazione**

##### Condizioni anemologiche ordinarie

Le fasi di lavoro vengono condotte per come previsto in progetto.

##### Condizioni anemologiche caratterizzate da vento superiore alla soglia di intervento

Tali condizioni anemologiche non dettano variazioni o interruzioni della lavorazione in oggetto.

##### Condizioni di pioggia

Condizioni di pioggia debole, moderata o forte non dettano variazioni o interruzioni della lavorazione in oggetto.

#### 4.4.6 **Misure per la mitigazione degli effetti sulle acque**

I potenziali rischi relativi alla componente idrica sono connessi a tre aspetti tra loro distinti:

- la percolazione delle acque piovane all'interno del corpo del rilevato con il rilascio della calce in esso contenuto all'interno della falda;
- il dilavamento delle scarpate del rilevato in fase di costruzione, con il trascinarsi della calce non trattata all'interno del reticolo idrografico superficiale;
- lo sversamento accidentale di calce direttamente nei corsi d'acqua principali.

L'utilizzo di calce per il trattamento di terreni argillosi altera un equilibrio preesistente, attraverso reazioni chimiche esotermiche pressoché immediate, che non comportano particolari disturbi all'ambiente circostante se controllate durante le fasi operative. Perciò l'unico potenziale rischio è da ricercarsi nell'evenienza di ingenti quantità di calce accidentalmente rilasciate tali da provocare l'innalzamento del pH di grossi volumi d'acqua a valori superiori a 10 per tempi significativi.

La durata della pioggia è in genere inversamente proporzionale alla sua intensità.

Pertanto:

- a) In caso di pioggia debole (1-2 mm/h), i lavori di spandimento della calce, di miscelazione con il terreno e di compattazione possono essere continuati in virtù del fatto che la stessa pioggia riduce la necessità di utilizzo di acqua durante le compattazioni e l'intensità della stessa non risulta essere determinante per effetti erosivi o di dilavamento;
- b) In caso di pioggia moderata (3-8 mm/h): non vi sono possibilità di impatti rilevanti a meno che notevoli pendenze non producano erosioni negli strati in corso di stabilizzazione; la compattazione degli strati di terreno con la calce rende praticamente impermeabile lo strato stesso tanto che si comporterà sotto la pioggia come una strada pavimentata,
- c) il dilavamento della calce durante la fase di spargimento ad opera dell'acqua nella zona di lavorazione potrebbe essere generato solo da eventi atmosferici estremi (piogge improvvise ed intense), durante i quali però sono previste le interruzioni lavorative e le disposizioni sopra indicate.

In caso di pioggia moderata o forte (oltre 10 mm/h) le lavorazioni non dovranno avere inizio e andranno sempre immediatamente sospese ad esclusione delle fasi di miscelazione eventualmente in corso, e di compattazione che saranno ugualmente completate secondo le procedure definite in precedenza.

I cantieri dovranno essere dotati di pluviometri per la misura, la registrazione e l'archiviazione dei dati pluviometrici.

#### 4.4.7 • **Percolazione delle acque piovane all'interno del corpo del rilevato:**

Per quanto riguarda questo aspetto è da evidenziare come nessuna percolazione sia possibile nel caso di terreni sottoposti a trattamento a calce e successivamente compattati, come nel caso della costruzione dei rilevati stradali, in quanto i valori di permeabilità in genere sono dell'ordine di  $10^{-10}$  ÷  $10^{-9}$  m/s.

Si possono anche prevedere prove di permeabilità sui rilevati trattati a calce volte a verificare la sussistenza di tali valori e quindi l'assenza di reali fenomeni di percolazione.

#### 4.4.8 • **Dilavamento della calce:**

Per quanto riguarda invece il potenziale rischio connesso al dilavamento delle scarpate, è richiesta particolare cura nell'evitare durante le operazioni di fresatura che venga lasciata calce non mescolata nelle parti laterali dei singoli strati. Ciò si ottiene portando la parte di calce non reagita, con escavatore, al centro dello strato in fase di fresatura, evitando così l'accumulo lungo i cigli delle scarpate laterali del rilevato di calce non legata e quindi soggetta a potenziale dilavamento in caso di pioggia moderata o forte.

È opportuno prevedere che al termine di ogni giornata lavorativa venga effettuata una nebulizzazione della parte di rilevato lavorata durante la giornata, allo scopo di fissare l'eventuale calce non reagita col terreno.

Tali accorgimenti consentono di limitare significativamente le quantità di calce potenzialmente dilavata e di confinarne il campo alla parte più esterna degli strati lavorati nel corso della giornata.

In caso di pioggia moderata o forte, la stabilizzazione a calce va sospesa, per evitare la stabilizzazione di terreno con grado di umidità elevato e fuori dal range stabilito in sede progettuale per rendere ottimale la reazione di stabilizzazione.

In tal caso si dovrà procedere alla rapida miscelazione tramite fresa dei primi 10 cm di terreno non ancora miscelato, nonché alla rapida compattazione tramite rullo di tutto il misto terra-calce, al fine di garantire l'impermeabilità dello strato, evitando il dilavamento delle aree interessate dalle lavorazioni.

Per quanto riguarda gli attraversamenti idraulici il rischio potenziale di introduzione di acqua con grossi quantitativi di calce dilavata va verificata in funzione delle distanze dei corpi d'acqua superficiali principali esistenti, rispetto alle aree oggetto di trattamento a calce. Vengono quindi previste prove di misurazione del pH di acque dilavate nell'ambito di cantieri di stabilizzazione a calce, al fine di dare evidenza della esclusione di ogni possibile contaminazione.

Le misure precauzionali su descritte sono da intendersi temporanee, da attuare esclusivamente nella fase di calce non reagita.

#### 4.4.9 • **Rilascio accidentale di calce direttamente nei corsi d'acqua principali:**

Il rischio di dilavamento di grossi quantitativi di calce può essere connesso al rilascio accidentale di grossi quantitativi di calce, tali da provocare l'innalzamento del pH di grossi volumi d'acqua a valori superiore a 10 per tempi significativi.

Affinché ciò possa avvenire occorre che si verifichino due eventi distinti:

- il rilascio accidentale di grossi quantitativi di calce;
- un evento piovoso improvviso, classificato moderato o forte, tale da registrare grosse quantità di acqua all'origine del potenziale dilavamento.

La concomitanza dei due eventi permette di stabilire come la probabilità del rischio sia estremamente bassa, ma per fronteggiare comunque tale rischio si dovrà prevedere che le operazioni di stesa della calce vengano sospese nel

caso di evento meteorico significativo e si dovrà limitare al minimo indispensabile, durante le fasi lavorative, i quantitativi di calce non mescolata i cui cumuli dovranno essere sistemati il più lontano possibile dal ciglio delle scarpate.

#### 4.5 Monitoraggio Meteorologico

##### 4.5.1 Rilievi anemometrici:

Ai fini del controllo delle condizioni anemologiche locali è opportuno prevedere che i cantieri siano dotati di un apposito sistema di rilevazione (anemometro) con registrazione automatica dell'intensità del vento posizionata in maniera tale da evitare gli osta

Il sistema dovrà essere configurato per attivare gli allarmi per eccesso di vento presso i singoli cantieri in attività.

Per non duplicare eccessivamente i rilievi anemometrici sarà possibile installare un anemometro presso i soli cantieri attivi in cui sono previste le attività di trattamento più estese (in termini di quantità e di durata temporale).

Sulla base del cronoprogramma e dei livelli di attività dei cantieri potranno essere individuate dei "cluster" di più cantieri, posti in ambiti omogenei sotto il profilo delle condizioni anemologiche, che faranno riferimento a un solo anemometro.

Al superamento della soglia di allarme un opportuno sistema di segnalazione dovrà essere attivato presso tutti i cantieri del "cluster" di riferimento dell'anemometro in cui è stato registrato il superamento.

Il campionamento dei dati anemologici dovrà avvenire con una frequenza non inferiore ad 1 dato ogni 10 s, ovvero almeno 6 campioni al minuto. I dati anemometrici saranno archiviati in forma di valore medio relativo ad un periodo di 15' (pari a 900 s, in cui quindi dovranno essere raccolti almeno 90 campioni). I dati anemometrici archiviati saranno resi disponibili agli Enti di controllo.

Compatibilmente con le dimensioni e le caratteristiche dei cantieri mobili, gli anemometri dovranno essere posizionati nell'ambito o in prossimità delle aree di cantiere, su terreno possibilmente piano, senza ostacoli fissi di altezza superiore a 3m in un intorno di almeno 20m, al di fuori delle aree di lavorazione e di movimentazione dei mezzi di cantiere.

Gli anemometri dovranno essere installati ad una quota pari ad 1 m da terra, in prossimità del cantiere di attività e, compatibilmente con la peculiarità dei luoghi, facendo attenzione a che non vi siano ostacoli rilevanti (ovvero con dimensioni in pianta maggiori di 4 m x 4 m ed aventi altezza superiore alla quota di installazione degli anemometri) per un raggio di circa 50 m intorno.

Gli anemometri potranno essere ricollocati in base all'avanzamento dei lavori e all'eventuale interessamento di ambiti territoriali diversi.

Le caratteristiche, la posizione ed il funzionamento degli anemometri, comprese le modalità di attivazione dei segnali di allarme, andranno comunicati all'Ente di Controllo entro l'inizio dei lavori.

##### 4.5.2 Rilievi pluviometrici:

I cantieri saranno dotati di pluviometri per la misura, la registrazione e l'archiviazione dei dati pluviometrici, collocati preferibilmente presso i relativi anemometri.

Le caratteristiche, la posizione ed il funzionamento dei pluviometri, andranno comunicati all'Ente di Controllo entro l'inizio dei lavori.