



COMUNE DI CASCINA

Provincia di Pisa



Committente:



Soc. T2D S.p.A.

via A. Canobbio, 34 – 37132 VERONA

Oggetto:

PROGETTO DI COLTIVAZIONE E DI RIPRISTINO AMBIENTALE DI UNA
CAVA DI ARGILLA POSTA IN LOCALITA' "BORGARELLO" - CASCINA (PI)

(L.R. n. 35/2015)

Elaborato:

RELAZIONE TECNICA DI PROGETTO

Data:

Luglio 2024

IL TECNICO:

Dott. Geol. Fabrizio Alvares

Dott. Geol. Fabrizio Alvares

Via L. Muratori n.1 - 56017 San Giuliano Terme

Cell. 3356067338 - fabrizio.alvares@gmail.com

1. PREMESSA

Con la presente relazione, redatta ai sensi dell'Art. 17 della L.R. 35/1015, viene descritto il progetto di coltivazione e di ripristino ambientale di una cava di argilla gestita dalla T2D S.p.A , ubicata in località Borgarello, comune di Cascina (**Fig.1**)



*Ubicazione del sito
in esame in Loc.
"Borgarello" nel Comune di
Cascina (PI)
- foto satellitare da Google
Earth*

Fig. 1 – corografia dell'area di cava

2. INQUADRAMENTO GENERALE DEL SITO ESTRATTIVO

L'area estrattiva si localizza nella porzione occidentale del territorio comunale di Cascina, nella pianura alluvionale a sud-ovest dell'abitato Cascina, in destra idrografica del Fosso d'Arno (o Arnaccio).

Come rappresentato nella planimetria di inquadramento generale di **TAV. 1**, la cava è ubicata in prossimità di un'altra cava, di più piccole dimensioni, gestita sempre dalla T2D (ex Donati Laterizi), in fase di ripristino ambientale; la viabilità impegnata per il transito in entrata e in uscita dei mezzi di trasporto delle terre è la stessa la strada vicinale San Paolo per un tratto di circa 800 m, fino all'innesto con via del Nugolaio e da qui la SS 206 per Collesalveti. Non è previsto transito dei mezzi di trasporto sulla via del Nugolaio in entrata e in uscita in direzione Navacchio. Nella **TAV. 2** si riporto la documentazione fotografica del sito di progetto da volo con drone.

3. PIANO DI COLTIVAZIONE

Nella **TAV. 3** è riportato il perimetro del comparto estrattivo e il perimetro dell'area interessata dall'escavazione.

In ottemperanza alle disposizioni di cui all'Art. 3, comma 1, della L.R. 41/2018, il limite di cava, lato sud ed est, è stato posizionato mantenendo una fascia di rispetto di 10 m dal ciglio di sponda del Fosso Borgarello (o delle Sedici).

Sul lato ovest il limite di cava è stato posizionato ad una adeguata distanza di sicurezza di oltre 20 m dalla strada vicinale San Paolo, che potrà essere impegnata dal transito dei mezzi d'opera.

3.1 fasi e metodi di coltivazione

Prima di dare inizio all'attività estrattiva s.s., si provvederà alla messa in opera di adeguata cartellonistica; si provvederà, inoltre, se necessario, all'esecuzione di interventi di manutenzione della strada vicinale di accesso alla cava con riprofilatura, sbanchinatura e affossature laterali.

Il progetto di coltivazione, prevede un unico lotto di coltivazione, con sviluppo dell'escavazione da sud verso nord, con asportazione del materiale argilloso con la tecnica a gradoni e metodologia "in fossa", per una profondità di scavo variabile tra 5 m e 6 m dal p.c.

La coltivazione, come osservabile dagli elaborati di progetto, avverrà procedendo dall'alto verso il basso, attraverso la creazione di n° 3 gradoni con alzata massima di circa 2,00 m, pedata di 4,00 m, fino al raggiungimento della profondità di scavo prevista, realizzando un piazzale in scavo via via sempre più ampio, nel quali sarà possibile effettuare, in tutta sicurezza, le operazioni di carico dei camion destinati al trasporto del materiale estratto all'impianto sito in Loc. "Gabbro".

Il volume complessivo di materiale produttivo estratto sarà pari a circa mc 216.000 mc.

Il progetto prevede l'escavazione del solo strato superficiale argilloso, senza intercettare lo strato di sabbie; ciò al fine di non avere interferenze con la falda e quindi di poter gestire lo scavo in maniera agevole, dovendo solo regimare le sole acque meteoriche ricadenti all'interno della cava in fossa.

Tali acque verranno pompate e fatte decantare in apposite vasche realizzate in scavo esternamente al perimetro di cava e quindi, tramite troppo pieno, reimmesse nelle scoline campestri poste al di fuori del perimetro di cava.

Le acque delle scoline campestri interrotte con gli scavi, verranno intercettate tramite fossetta di guardia realizzata sul fronte nord di scavo e rimesse nel sempre retico campestre posto al di fuori del perimetro di cava.

La successione temporale della coltivazione è rappresentata nelle **TAV. 4 - TAV. 5 – TAV. 6**

3.2 Modalità operative di gestione dell'escavazione e cantierizzazione

I materiali scavati verranno direttamente caricati tal quali sui camion e trasportati allo stabilimento produttivo di Gabbro (LI).

Non sono pertanto previsti cumuli di stoccaggio e ciò consente di avere aree di lavoro sempre libere, su cui poter agevolmente circolazione con i mezzi d'opera e di trasporto.

Nella planimetria di **TAV. 7** sono riportate le aree di lavorazione e organizzazione del cantiere.

Come visto le lavorazioni riguarderanno lo scavo delle argille mediante mezzo escavatore, il carico sui camion e il trasporto diretto allo stabilimento di Gabbro.

I mezzi di trasporto transiteranno in ingresso e in uscita dalla cava dalla rampa posizionata nel settore sud-ovest di cava.

Essendo il sito di cava molto esteso e poco frequentato, ai fini della sicurezza delle persone non sono previsti specifici ripari ma è sufficiente posizionare un numero adeguato di cartelli ammonitori lungo tutto il perimetro di cava.

Come per norma, prima dell'inizio dei lavori, sarà redatto il DSS ai sensi del D Lgs 694/96, dove saranno disciplinate tutte le misure per la tutela della sicurezza e della salute dei lavoratori.

3.3 Destinazione finale del sito estrattivo

Lo stato finale di coltivazione prevede il mantenimento dell'escavazione in fossa al fine di poter realizzare un invaso ad uso irriguo per l'agricoltura, ricaricato dalle acque meteoriche di scorrimento superficiale, secondo lo studio idraulico condotto dal Prof. Ing. Stefano Pagliara di cui si allega relativa documentazione tecnica.

Ciò consentirà di accumulare importanti quantitativi di acqua che sarà messa a disposizione degli agricoltori locali in un'ottica di riutilizzo e risparmio della risorsa idrica, da ritenersi di fondamentale importanza in considerazione dell'evoluzione climatiche di questi ultimi anni verso periodi siccitosi sempre più caldi e più prolungati.

Per quanto concerne gli aspetti naturalistici, come evidenziato nel contributo dell'Associazione Legambiente, è da rilevare che i bacini di origine estrattiva ad uso irriguo rappresentano tipi di zone umide diverse rispetto ai chiari, in quanto si caratterizzano da sponde ripide e maggiore profondità delle acque, fino a qualche metro. Questo, se da un lato consente l'accesso a un numero minore di specie rispetto ai chiari, limitando la frequentazione di aironi, limicoli e delle varie specie delle zone umide che non nuotano ma si nutrono camminando nelle acque basse, dall'altro lato costituisce l'habitat idoneo per quegli uccelli acquatici, come folaghe, svassi e anatre tuffatrici, che prediligono le acque profonde.

I bacini estrattivi e quelli irrigui contribuiscono così ad arricchire un mosaico ambientale di habitat acquatici e sono allagati per tutti i mesi dell'anno, fornendo alla fauna selvatica un luogo di rifugio e alimentazione anche nei periodi di maggiore siccità.

3.4 Macchine e attrezzature

Le lavorazioni avverranno esclusivamente mediante l'uso di escavatore idraulico girevole di adeguata potenza. Il materiale sarà asportato "tal quale" fino all'ottenimento dell'assetto topografico di progetto e trasportato allo stabilimento produttivo della T2D in Loc. "Gabbro" (LI).

Non è previsto nessun impianto di prima lavorazione, né opere edilizie a servizio dell'attività estrattiva.

3.5 Viabilità

Come visto la viabilità impegnata per il transito in entrata e in uscita dei mezzi di trasporto delle terre è la strada vicinale San Paolo per circa 800 m, fino all'innesto con via del Nugolaio e da qui la SS 206 per Collesalveti. Non è previsto transito dei mezzi di trasporto sulla via del Nugolaio in entrata e in uscita in direzione Navacchio (**Fig. 2**).

Verrà realizzato un breve tratto di viabilità bianca di accesso all'area di scavo che proseguirà con una rampa di pendenza adeguata al transito dei camion.

3.6 Considerazioni in merito alla produzione di polveri

I camion vengono caricati direttamente dal fronte di cava per cui le potenziali fonti di emissioni sono principalmente quelle indotte dal transito degli automezzi in uscita dalla cava, in quanto, essendo le argille materiale compatto non polverulento, nelle fasi di scavo la produzione di polveri sarà del tutto trascurabile.

Per tale argomento si rimanda alla relazione VEPD a firma dell'Ing. Giovanni Magnani.

La ditta è dotata di autobotte e sistemi di inaffiamento che vengono regolarmente utilizzati per bagnare il piazzale e la strada di arroccamento, al fine di contenere l'emissione di polveri.

3.7 Produzione di rifiuti

Nell'ambito dell'attività estrattiva non è prevista nessuna produzione di rifiuti di estrazione di cui al D.Lgs. 117/08, né diversi da quelli di estrazione di cui alla parte IV del D.Lgs. 152/2006

3.8 Schema di gestione delle acque meteoriche

Le acque meteoriche ricadenti all'interno della cava verranno pompate in vasche di sedimentazione realizzate in scavo, seguendo l'andamento dell'escavazione, esternamente al perimetro di cava lato ovest e da qui, tramite troppo pieno, reimmesse nelle scoline campestri esistenti.

Le acque delle scoline campestri interrotte con gli scavi sul lato nord di cava, verranno intercettate tramite fossa di guardia e raccordate con il retico di fosse campestri esterne al perimetro di cava.

Per i dettagli si rimanda allo specifico elaborato Piano di gestione delle AMD, allegato.

Il ciclo di lavorazione svolto all'interno del sito di cava consiste essenzialmente nella realizzazione dello scavo in fossa.

Il rischio di inquinamento delle AMD da parte di agenti chimici è praticamente nullo ed è connesso al solo sversamento accidentale di materiale inquinante da parte dei mezzi d'opera e/o di trasporto, fatto peraltro assai remoto in quanto gli stessi vengono regolarmente revisionati per il buon funzionamento e per prevenire eventuali sversamenti accidentali.

E' da considerare altresì che le lavorazioni avverranno solo in assenza di eventi meteorici.

VIABILITA' DI TRANSITO DEI MEZZI DI TRASPORTO DELL'ARGILLA
SCALA 1:25.000

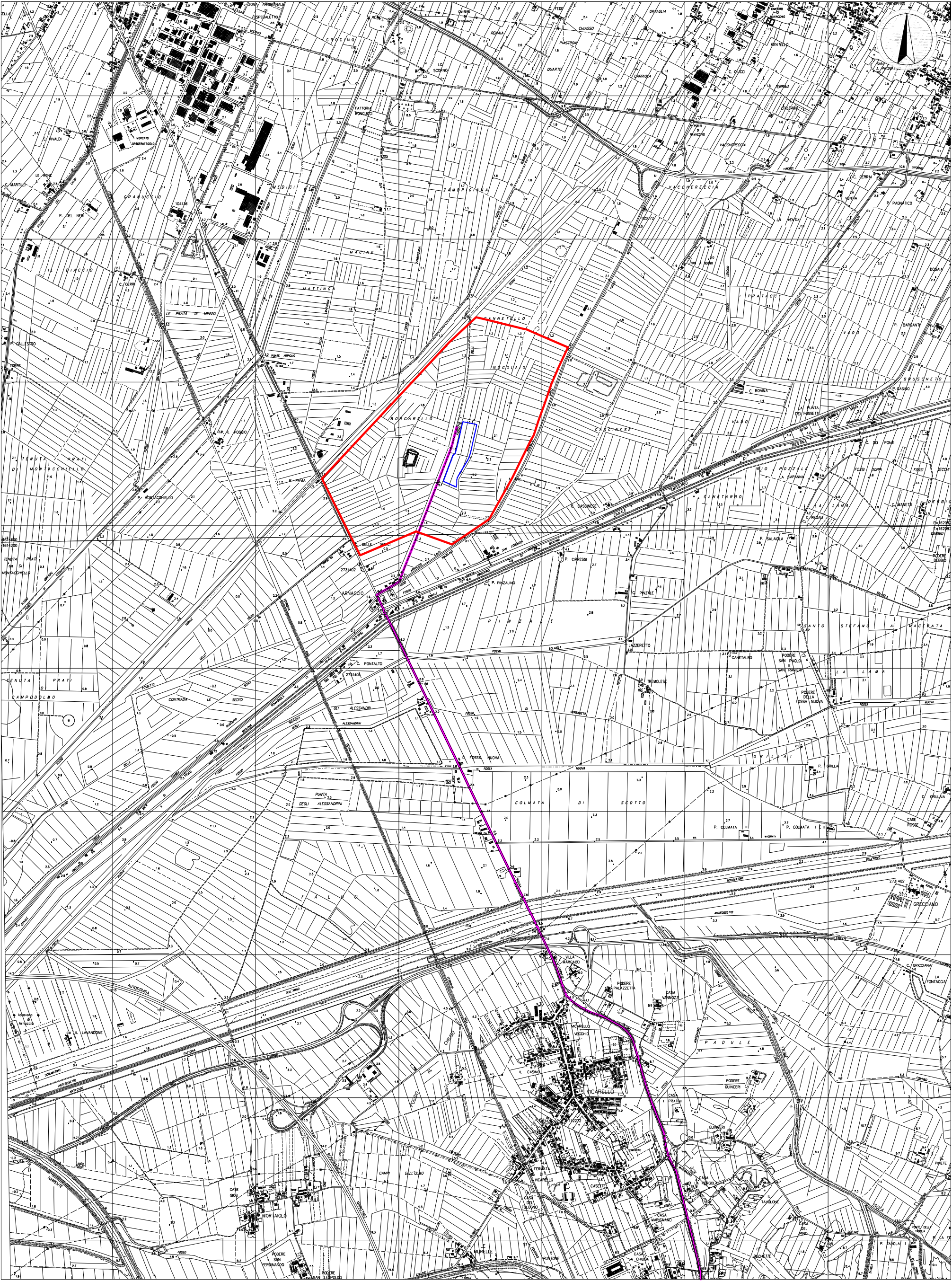


Fig. 2

In caso di sversamenti accidentali come carburanti ed oli idraulici, si procederà con l'immediata rimozione del terreno risultato contaminato che verrà regolarmente smaltimento ad impianto autorizzato.

3.9 Verifiche di stabilità

Metodo di calcolo

Con riferimento al D.M. 17/01/2018, per il calcolo della stabilità del fronte di cava con relativo fattore di sicurezza, è stato utilizzato il software "Slope" della Geostru.

Dalle verifiche di stabilità emerge un fattore di sicurezza (Fs), dato dal rapporto tra forze resistenti (Rd) ed azioni di progetto (Ed), che permette di identificare il grado di stabilità del versante analizzato; in riferimento alla condizione 6.2.4.1 del D.M. 17/01/2018, le verifiche sono soddisfatte quando $Ed \leq Rd$, ovvero il valore del fattore di sicurezza restituito deve essere maggiore od uguale ad 1.

L'analisi è stata effettuata attraverso il metodo dell'equilibrio limite secondo sia la teoria di Janbu che di Bishop, sia in condizioni statiche che sismiche, che considerano superfici di scorrimento circolari (geometria che caratterizza i dissesti in terreni a componente argillosa come nel caso in esame) e di forma generica (simulando la presenza di discontinuità lungo le quali possono instaurarsi scivolamenti preferenziali) ed inoltre risultano i più cautelativi dal punto di vista del fattore di sicurezza restituito.

Tali metodologie di verifica, attraverso un procedimento iterativo, permette di individuare il volume di terreno per il quale si creano le condizioni più gravose per l'equilibrio sotto le azioni inerziali sismiche (riferite ad un evento con tempo di ritorno di 475 anni "SLV").

Ai terreni interessati dall'escavazione sono stati attribuiti i seguenti parametri geotecnici:

- Argille limose mediamente compatte: $\gamma = 1,9 \text{ t/m}^3$ $\varphi' = 26^\circ$ $c' = 0,20 \text{ kg/cm}^2$
- Categoria di sottosuolo "D"

Risultati

Dalle verifiche di stabilità sono emersi fattori di sicurezza pienamente soddisfacenti (vedi report completo **Allegato 1**)

3.10 Opere di urbanizzazione primaria, impianti di lavorazione

Sono previste opere di urbanizzazione fuori comparto, relative agli interventi di manutenzione straordinaria da eseguirsi in ottemperanza alle prescrizioni della Provincia di Pisa, all'innesto della strada vicinale San Paolo con la via del Nugolaio, per i cui dettagli si rimanda agli elaborati di progetto allegati, a firma di TAGES s.c.r.l.

3.11 Tipologia e quantità dei materiali estratti

Dalla cava verranno estratti terreni argillosi e limose. Nella sottostante tabella vengono riassunti i principali dati progetto:

Area in coltivazione (mq)	Volume di materiale produttivo scavato (mc)
44.000	216.000

Non si prevede nessun accumulo di terreno in situ e anche il materiale di scoperchiatura e scotico superficiale verrà trasportato preso lo stabilimento e attigua cava T2D del Gabbro.

4. PIANO DI RIPRISTINO AMBIENTALE

Al termine delle operazioni di coltivazione si procederà con le operazioni di ripristino finale dell'area che procederanno secondo il seguente programma:

- sistemazione e inerbimento delle aree esterne alla cava interessate alle lavorazioni e transito automezzi, stimata per una fascia esterna di circa 10 m da bordo scavo.
- Ripristino delle scoline campestri;
- Realizzazione di recinzione lungo tutto il perimetro di cava, con cancello di ingresso chiuso con lucchetto e posa in opera di cartello indicatore.
- Al fine di ottenere una sistemazione definitiva ed equilibrata dal punto di vista ecologico e paesaggistico, come indicato nella planimetria di **TAV. 8** rappresentativa dello stato finale di ripristino, al margine della cava in dismissione è previsto l'impianto di alberature per gruppi disomogenei distanziati di circa 20-25 m l'uno dall'altro. A tale riguardo, nella seguente tabella sono indicate alcune specie arboree che, per caratteristiche ecologiche e funzionali, appaiono più indicate per il ripristino ambientale dell'area.

Nella **TAV. 9** si riporta la foto-modellazione dello stato attuale-stato di progetto.

Nome volgare	Nome scientifica	Altezza max.	Densità chioma	Periodo fioritura	Tipo di suolo	Resistenza all'inquinamento	Umidità	Granulometria	Luce	Resistenza basse temp.	Importanza per la fauna	Tipo di uso
Pioppo nero	<i>Populus nigra</i>	20-25 mt.		III-IV	T.C.	B	S	3-4	4	M	E.I.	Barriera
Pioppo tremula	<i>Populus tremula</i>	15-25 mt.		III-IV	Q	B	2	3	4	B	E.I.	Consolidamento, Barriera
Salice bianco	<i>Salix alba</i>	10-15 mt.		IV-V	T.C.	B	3-4	3	3	B	E.I.	Barriera
Ontano nero	<i>Alnus glutinosa</i>	15-20 mt.		II-IV	Q	B	3-4	4	3	B	E.I.	Consolidamento, Barriera
Pioppo bianco	<i>Populus alba</i>	20-25 mt.		II-III	Q	B	3	3	3	B	E.I.	Siepi, Miglioramenti
Olio campestre	<i>Ulmus minor</i>	20-25 mt.		III-IV	T.C.	B	2-3	3	3	M	E.I.	Siepi, Consolidamento

Specie arboree adatte al ripristino ambientale dell'area.

4.1 Tecniche di inerbimento

L'inerbimento delle aree interessate da transito automezzi avverrà mediante semina a spaglio di idonee specie erbacee.

Un buon miscuglio di semi è composto da graminacee, ad azione radicale superficiale, che servirà per raggiungere obiettivi di carattere idrogeologico (azione antierosiva), e da leguminose, con azione radicale profonda e con capacità di arricchimento del terreno con azoto.

5. INTERVENTI FUNZIONALI ALLA MESSA IN SICUREZZA DELLO SPECCHIO D'ACQUA

Al fine di garantire adeguate condizioni di sicurezza, una volta ultimate le lavorazioni, tutto l'invaso verrà recintato con rete metallica sorretta con pali in legno altezza 2 m.

6. PIANO DI MONITORAGGIO DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Stante la situazione idrogeologica del sito di cava, dove si rileva la presenza di un modesto acquifero confinato contenuto nell'orizzonte sabbioso presente al di sotto dello strato argilloso oggetto di escavazione, sarà attivato un monitoraggio ambientale delle acque sotterranee attraverso il campionamento periodico di n.3 piezometri di profondità 8 m già realizzati sul sito di cava, la cui ubicazione è riportata in **Fig. 3**.

Il programma di monitoraggio e controllo (PMC), prevede un campionamento iniziale prima dell'inizio dei lavori e campionamenti successivi con cadenza semestrale in concomitanza con il periodo di morbida e di magra ed il seguente programma di analisi: Solfati, Cloruri, Nitrati, B, As, Mn, Fe, Pb, Zn, Cu, Cd, Ni, Cromo tot, idrocarburi totali.

7. PIANO DI MANUTENZIONE

Preliminarmente all'inizio dei lavori, durante le fasi escavazione e ripristino e al termine delle lavorazioni, è previsto un piano di manutenzione sia interna che esterna al comparto.

Per quanto concerne le opere esterne al comparto, prima dell'inizio dei lavori, come visto, saranno realizzate le opere prescritte dalla Provincia di Pisa e sono previste le opere di adeguamento della viabilità prevista la manutenzione con cadenza almeno annuale della viabilità vicinale San Paolo per il tratto non asfaltato interessato dal transito dei camion, dall'innesto con la via del Nugolaio fino all'ingresso in cava, tramite il rinterro delle buche e avvallamenti generati dal transito del camion, eseguiti con mezzi meccanici con materiale arido di cava.

A fine lavori, nello stesso tratto, è previsto il ripristino di tutta la sede stradale, sempre mediante riporto di materiale arido di cava con mezzi meccanici.

Relativamente al comparto di cava, alla fine dei lavori è previsto un programma biennale di manutenzione del verde, ed in particolare:

- La sostituzione delle alberature non attecchite;
- Il taglio dell'erba quattro volte l'anno, per una fascia di 10 m esterna alla recinzione.

8. TEMPI DI ATTUAZIONE

Alla luce dei dati delle attuali produzioni, il fabbisogno di questa tipologia di argilla usata in produzione in miscela con altre tipologie di terre, è di circa 20.000 mc/anno.

Sulla base del suddetto dato, per completare l'escavazione dei 216.000 mc di progetto e attuare gli interventi di risistemazione ambientale sono previsti **11 anni**, oltre a **2 anni** per le manutenzioni.

Di seguito di riporta il cronoprogramma del progetto, relativo alle distinte fasi di lavorazione.

CRONOPRGRAMMA	anni		1		2		3		4		5		6		7		8		9		10		11		12		13							
	mesi		6	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	78	84	90	96	102	108	114	120	126	132	138	144	150	156						
SCAVO			FASE 1								FASE 2								FASE 3															
SISTEMAZIONI E PIANTUMAZIONI																																		
MANUTENZIONE																																		

9. PROGRAMMA ECONOMICO-FINANZIARIO DI COPERTURA DEGLI INVESTIMENTI

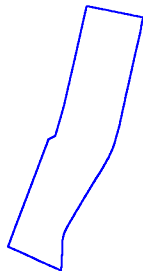
I lavori di escavazione e trasporto terre verranno integralmente appaltati a ditta esterna per cui non è previsto nessun tipo d'investimento.

UBICAZIONE NUOVI PIEZOMETRI DI MONITORAGGIO ACQUE SOTTERRANEE

SCALA 1:2.000



LEGENDA



Area di cava
in progetto



PZ. 3
Nuovi Piezometri monitoraggio acque sotterranee

Fig. 3

Relazione di calcolo

Definizione

Per pendio s'intende una porzione di versante naturale il cui profilo originario è stato modificato da interventi artificiali rilevanti rispetto alla stabilità. Per frana s'intende una situazione di instabilità che interessa versanti naturali e coinvolgono volumi considerevoli di terreno.

Introduzione all'analisi di stabilità

La risoluzione di un problema di stabilità richiede la presa in conto delle equazioni di campo e dei legami costitutivi. Le prime sono di equilibrio, le seconde descrivono il comportamento del terreno. Tali equazioni risultano particolarmente complesse in quanto i terreni sono dei sistemi multifase, che possono essere ricondotti a sistemi monofase solo in condizioni di terreno secco, o di analisi in condizioni drenate.

Nella maggior parte dei casi ci si trova a dover trattare un materiale che se saturo è per lo meno bifase, ciò rende la trattazione delle equazioni di equilibrio notevolmente complicata. Inoltre è praticamente impossibile definire una legge costitutiva di validità generale, in quanto i terreni presentano un comportamento non-lineare già a piccole deformazioni, sono anisotropi ed inoltre il loro comportamento dipende non solo dallo sforzo deviatorico ma anche da quello normale. A causa delle suddette difficoltà vengono introdotte delle ipotesi semplificative:

1. Si usano leggi costitutive semplificate: modello rigido perfettamente plastico. Si assume che la resistenza del materiale sia espressa unicamente dai parametri coesione (c) e angolo di resistenza al taglio (φ), costanti per il terreno e caratteristici dello stato plastico; quindi si suppone valido il criterio di rottura di Mohr-Coulomb.
2. In alcuni casi vengono soddisfatte solo in parte le equazioni di equilibrio.

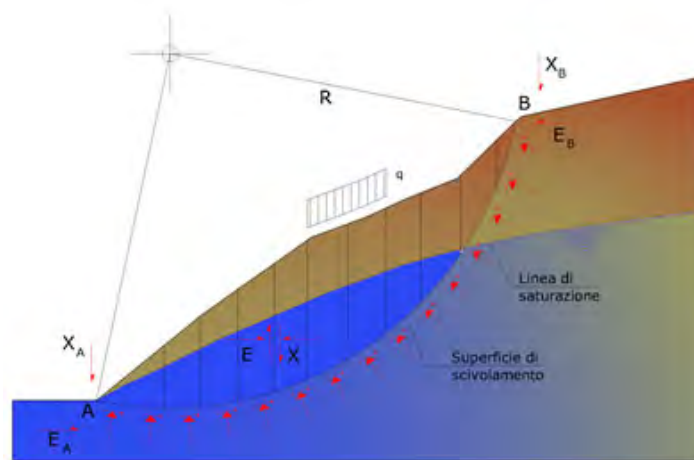
Metodo equilibrio limite (LEM)

Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio (τ) e confrontate con la resistenza disponibile (τ_f), valutata secondo il criterio di rottura di Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza:

$$F = \tau_f / \tau$$

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Culman), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (Fellenius, Bishop, Janbu ecc.).

Di seguito vengono discussi i metodi dell'equilibrio limite dei concii.



Metodo dei concii

La massa interessata dallo scivolamento viene suddivisa in un numero conveniente di concii. Se il numero dei concii è pari a n , il problema presenta le seguenti incognite:

- n valori delle forze normali N_i agenti sulla base di ciascun concio;
- n valori delle forze di taglio alla base del concio T_i ;
- $(n-1)$ forze normali E_i agenti sull'interfaccia dei concii;
- $(n-1)$ forze tangenziali X_i agenti sull'interfaccia dei concii;
- n valori della coordinata a che individua il punto di applicazione delle E_i ;
- $(n-1)$ valori della coordinata che individua il punto di applicazione delle X_i ;
- una incognita costituita dal fattore di sicurezza F .

Complessivamente le incognite sono $(6n-2)$.

Mentre le equazioni a disposizione sono:

- equazioni di equilibrio dei momenti n ;
- equazioni di equilibrio alla traslazione verticale n ;
- equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale n ;
- equazioni relative al criterio di rottura n .

Totale numero di equazioni $4n$.

Il problema è staticamente indeterminato ed il grado di indeterminazione è pari a :

$$i = (6n - 2) - (4n) = 2n - 2$$

Il grado di indeterminazione si riduce ulteriormente a $(n-2)$ in quanto si fa l'assunzione che N_i sia applicato nel punto medio della striscia. Ciò equivale ad ipotizzare che le tensioni normali totali siano uniformemente distribuite.

I diversi metodi che si basano sulla teoria dell'equilibrio limite si differenziano per il modo in cui vengono eliminate le $(n-2)$ indeterminazioni.

Metodo di Fellenius (1927)

Con questo metodo (valido solo per superfici di scorrimento di forma circolare) vengono trascurate le forze di interstriscia pertanto le incognite si riducono a:

- n valori delle forze normali N_i ;
- n valori delle forze da taglio T_i ;
- 1 fattore di sicurezza.

Incognite $(2n+1)$.

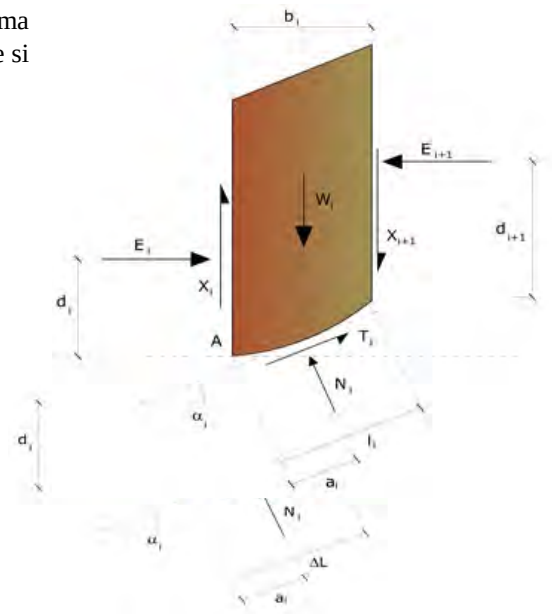
Le equazioni a disposizione sono:

- n equazioni di equilibrio alla traslazione verticale;
- n equazioni relative al criterio di rottura;
- equazione di equilibrio dei momenti globale.

$$F = \frac{\sum \{ c_i \times l_i + (W_i \times \cos \alpha_i - u_i \times l_i) \times \tan \varphi_i \}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$

Questa equazione è semplice da risolvere ma si è trovato che fornisce risultati conservativi (fattori di sicurezza bassi) soprattutto per superfici profonde.

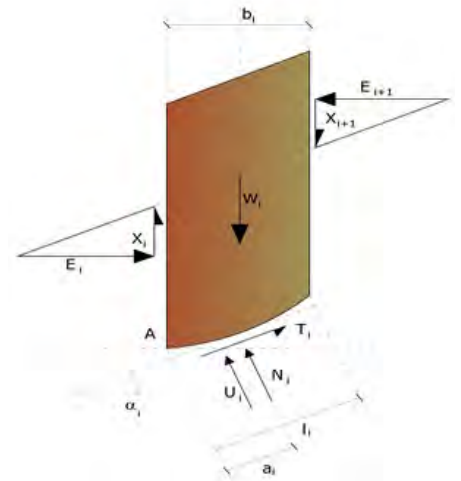
Metodo di Bishop (1955)



Con tale metodo non viene trascurato nessun contributo di forze agenti sui blocchi e fu il primo a descrivere i problemi legati ai metodi convenzionali. Le equazioni usate per risolvere il problema sono:

$$\sum F_y = 0, \quad \sum M_0 = 0 \quad \text{Criterio di rottura}$$

$$F = \frac{\sum \{c_i \times b_i + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \varphi_i\} \times \frac{\sec \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \varphi_i / F}}{\sum W_i \times \sin \alpha_i}$$



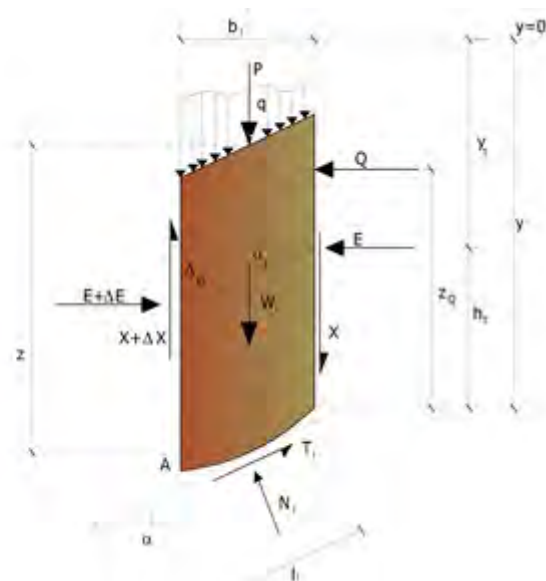
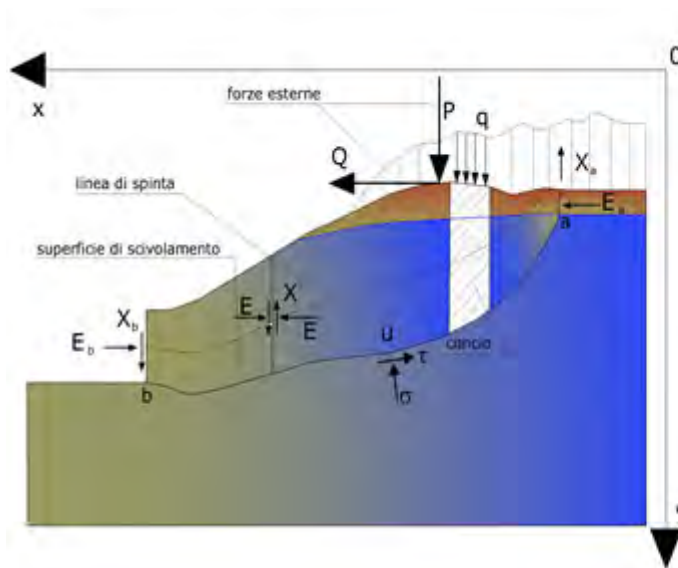
I valori di F e di ΔX per ogni elemento che soddisfano questa equazione danno una soluzione rigorosa al problema. Come prima approssimazione conviene porre $\Delta X = 0$ ed iterare per il calcolo del fattore di sicurezza, tale procedimento è noto come metodo di **Bishop ordinario**, gli errori commessi rispetto al metodo completo sono di circa 1 %.

Metodo di Janbu (1967)

Janbu estese il metodo di Bishop a superfici di scorrimento di forma qualsiasi.

Quando vengono trattate superfici di scorrimento di forma qualsiasi il braccio delle forze cambia (nel caso delle superfici circolari resta costante e pari al raggio). A tal motivo risulta più conveniente valutare l'equazione del momento rispetto allo spigolo di ogni blocco.

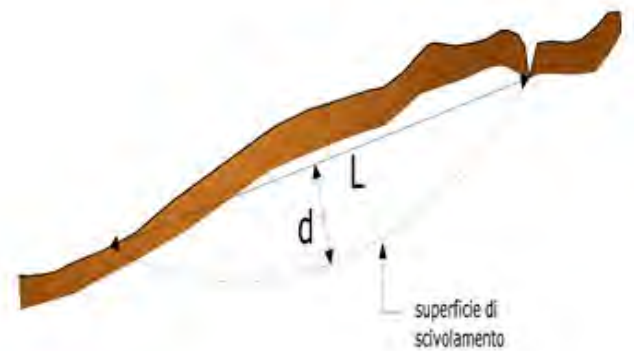
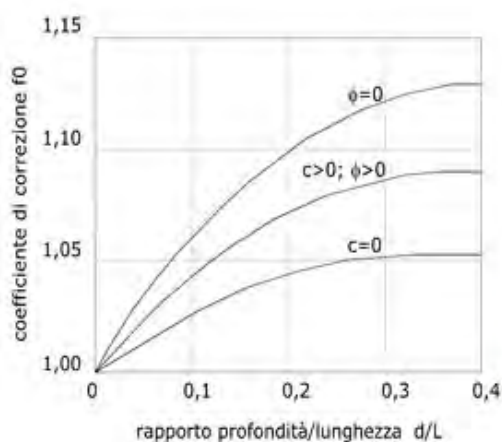
$$F = \frac{\Sigma\{c_i \times b + (W_i - u_i \times b_i + \Delta X_i) \times \tan \phi_i\} \times \frac{\sec^2 \alpha_i}{1 + \tan \alpha_i \times \tan \phi_i / F}}{\Sigma W_i \times \tan \alpha_i}$$



Assumendo $\Delta X_i = 0$ si ottiene il metodo ordinario. Janbu propose inoltre un metodo per la correzione del fattore di sicurezza ottenuto con il metodo ordinario secondo la seguente:

$$F_{\text{corretto}} = f_0 \cdot F$$

dove f_0 è riportato in grafici funzione di geometria e parametri geotecnici. Tale correzione è molto attendibile per pendii poco inclinati.



Valutazione dell'azione sismica

La stabilità dei pendii nei confronti dell'azione sismica viene verificata con il metodo pseudo-statico. Per i terreni che sotto l'azione di un carico ciclico possono sviluppare pressioni interstiziali elevate viene considerato un aumento in percento delle pressioni neutre che tiene conto di questo fattore di perdita di resistenza.

Ai fini della valutazione dell'azione sismica vengono considerate le seguenti forze:

$$F_H = K_x W$$

$$F_V = K_y W$$

Essendo:

- F_H e F_V rispettivamente la componente orizzontale e verticale della forza d'inerzia applicata al baricentro del concio;
- W peso concio;
- K_x coefficiente sismico orizzontale;
- K_y coefficiente sismico verticale.

Ricerca della superficie di scorrimento critica

In presenza di mezzi omogenei non si hanno a disposizione metodi per individuare la superficie di scorrimento critica ed occorre esaminarne un numero elevato di potenziali superfici.

Nel caso vengano ipotizzate superfici di forma circolare, la ricerca diventa più semplice, in quanto dopo aver posizionato una maglia dei centri costituita da m righe e n colonne saranno esaminate tutte le superfici aventi per centro il generico nodo della maglia $m \times n$ e raggio variabile in un determinato range di valori tale da esaminare superfici cinematicamente ammissibili.

Analisi di stabilità dei pendii con: JANBU (1967) CONDIZIONE SISMICA

```
=====
Lat./Long.                                     43,654581/10,456086
Calcolo eseguito secondo                       NTC 2018
Numero di strati                               1,0
Numero dei conci                              10,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile        1,1
Coefficiente parziale resistenza              1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito: Picco
Analisi                                         Condizione drenata
Superficie di forma circolare
=====
```

Maglia dei Centri

```
=====
Ascissa vertice sinistro inferiore xi          -0,56 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi         6,95 m
Ascissa vertice destro superiore xs           45,99 m
Ordinata vertice destro superiore ys          15,75 m
Passo di ricerca                              10,0
Numero di celle lungo x                      10,0
Numero di celle lungo y                      10,0
=====
```

Coefficienti sismici [N.T.C.]

Dati generali

```
Tipo opera:                2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:               Classe II
Vita nominale:              50,0 [anni]
Vita di riferimento:        50,0 [anni]
```

Parametri sismici su sito di riferimento

```
Categoria sottosuolo:      D
Categoria topografica:     T1
```

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30,0	0,38	2,57	0,23
S.L.D.	50,0	0,49	2,52	0,25
S.L.V.	475,0	1,21	2,48	0,28

S.L.C.	975,0	1,53	2,49	0,28
--------	-------	------	------	------

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

S.L. Stato limite	amax [m/s²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,684	0,2	0,014	0,007
S.L.D.	0,882	0,2	0,018	0,009
S.L.V.	2,178	0,24	0,0533	0,0267
S.L.C.	2,754	0,24	0,0674	0,0337

Coefficiente azione sismica orizzontale 0,053

Coefficiente azione sismica verticale 0,027

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	11,7	0,0
3	12,9	0,4
4	16,9	0,4
5	19,0	1,4
6	23,0	1,4
7	25,6	3,4
8	29,6	3,4
9	32,1	5,6
10	34,0	5,6
11	35,0	5,5
12	37,2	5,5
13	40,4	5,4
14	43,5	5,3

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili 1,0 1,0

Favorevoli: Permanenti, variabili 1,0 1,0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio 1,25

Coesione efficace 1,25

Coesione non drenata 1,4

Riduzione parametri geotecnici terreno Si

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm²)	Coesione non drenata (kg/cm²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m³)	Peso saturo (Kg/m³)	Litologia
1	0,20		26	1900	2100,00	

Risultati analisi pendio [A2+M2+R2]

Fs minimo individuato	2,17
Ascissa centro superficie	25,04 m
Ordinata centro superficie	7,39 m
Raggio superficie	9,64 m

xc = 25,045 yc = 7,391 Rc = 9,641 Fs=2,166

Nr.	B m	Alfa (°)	Li m	Wi (Kg)	Kh•Wi (Kg)	Kv•Wi (Kg)	c (kg/cm²)	Fi (°)	Ui (Kg)	N'i (Kg)	Ti (Kg)
1	1,07	-43,2	1,47	1628,36	86,3	43,97	0,16	21,3	0,0	3918,8	2460,6
2	2,24	-31,0	2,62	9793,56	519,06	264,43	0,16	21,3	0,0	14121,2	5223,6
3	1,66	-18,0	1,74	10019,6	531,04	270,53	0,16	21,3	0,0	11639,4	3559,0
4	1,66	-7,9	1,67	12985,88	688,25	350,62	0,16	21,3	0,0	13619,0	3724,1
5	1,04	0,2	1,04	10379,56	550,12	280,25	0,16	21,3	0,0	10370,1	2636,2
6	2,28	10,2	2,31	23783,24	1260,51	642,15	0,16	21,3	0,0	23109,4	5963,7
7	1,66	22,4	1,79	15527,25	822,94	419,24	0,16	21,3	0,0	15126,1	4379,7
8	1,66	33,7	1,99	14877,71	788,52	401,7	0,16	21,3	0,0	15087,3	5033,9
9	0,91	43,3	1,25	8341,45	442,1	225,22	0,16	21,3	0,0	9058,3	3509,1
10	2,41	63,0	5,31	14564,43	771,91	393,24	0,16	21,3	0,0	18022,6	15787,8

Analisi di stabilità dei pendii con: JANBU (1967) CONDIZIONE STATICA

Lat./Long.	43,654581/10,456086
Calcolo eseguito secondo	NTC 2018
Numero di strati	1,0
Numero dei conci	10,0
Grado di sicurezza ritenuto accettabile	1,1
Coefficiente parziale resistenza	1,0
Parametri geotecnici da usare. Angolo di attrito:	Picco
Analisi	Condizione drenata
Superficie di forma circolare	

Maglia dei Centri

Ascissa vertice sinistro inferiore xi	-0,56 m
Ordinata vertice sinistro inferiore yi	6,95 m
Ascissa vertice destro superiore xs	45,99 m
Ordinata vertice destro superiore ys	15,75 m
Passo di ricerca	10,0
Numero di celle lungo x	10,0
Numero di celle lungo y	10,0

Coefficienti sismici [N.T.C.]**Dati generali**

Tipo opera:	2 - Opere ordinarie
Classe d'uso:	Classe II
Vita nominale:	50,0 [anni]

Vita di riferimento: 50,0 [anni]

Parametri sismici su sito di riferimento

Categoria sottosuolo: D
Categoria topografica: T1

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30,0	0,38	2,57	0,23
S.L.D.	50,0	0,49	2,52	0,25
S.L.V.	475,0	1,21	2,48	0,28
S.L.C.	975,0	1,53	2,49	0,28

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Stabilità dei pendii e Fondazioni

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0,684	0,2	0,014	0,007
S.L.D.	0,882	0,2	0,018	0,009
S.L.V.	2,178	0,24	0,0533	0,0267
S.L.C.	2,754	0,24	0,0674	0,0337

Coefficiente azione sismica orizzontale 0,018
Coefficiente azione sismica verticale 0,009

Vertici profilo

Nr	X (m)	y (m)
1	0,0	0,0
2	11,7	0,0
3	12,9	0,4
4	16,9	0,4
5	19,0	1,4
6	23,0	1,4
7	25,6	3,4
8	29,6	3,4
9	32,1	5,6
10	34,0	5,6
11	35,0	5,5
12	37,2	5,5
13	40,4	5,4
14	43,5	5,3

Coefficienti parziali azioni

Sfavorevoli: Permanenti, variabili 1,0 1,0
Favorevoli: Permanenti, variabili 1,0 1,0

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Tangente angolo di resistenza al taglio 1,25
Coesione efficace 1,25

Coesione non drenata	1,4
Riduzione parametri geotecnici terreno	Si

=====

Stratigrafia

Strato	Coesione (kg/cm²)	Coesione non drenata (kg/cm²)	Angolo resistenza al taglio (°)	Peso unità di volume (Kg/m³)	Peso saturo (Kg/m³)	Litologia
1	0,20		26	1900	2100,00	

Risultati analisi pendio [A2+M2+R2]

Fs minimo individuato	2,42
Ascissa centro superficie	25,04 m
Ordinata centro superficie	7,39 m
Raggio superficie	9,64 m

=====

Numero di superfici esaminate....(143)

N°	Xo	Yo	Ro	Fs
1	8,8	7,0	10,1	17,92
2	11,1	7,4	12,0	8,20
3	13,4	7,0	10,5	7,05
4	15,7	7,4	12,1	4,16
5	18,1	7,0	10,4	3,52
6	20,4	7,4	12,1	2,92
7	22,7	7,0	10,4	2,57
8	25,0	7,4	9,6	2,42
9	27,4	7,0	8,0	2,52
10	29,7	7,4	9,6	2,93
11	32,0	7,0	4,7	3,71
12	34,4	7,4	7,5	5,42
13	36,7	7,0	3,0	20,00
14	39,0	7,4	3,0	20,00
15	41,3	7,0	2,6	20,00
16	8,8	7,8	10,6	18,53
17	11,1	8,3	12,5	8,30
18	13,4	7,8	11,1	7,09
19	15,7	8,3	12,9	4,13
20	18,1	7,8	11,2	3,43
21	20,4	8,3	11,7	3,19
22	22,7	7,8	11,3	2,57
23	25,0	8,3	10,5	2,54
24	27,4	7,8	8,9	2,56
25	29,7	8,3	10,3	2,96
26	32,0	7,8	6,0	3,79
27	34,4	8,3	7,8	5,53
28	36,7	7,8	3,9	20,00
29	39,0	8,3	3,5	20,00
30	41,3	7,8	3,2	20,00
31	8,8	8,7	10,0	27,15
32	11,1	9,2	13,1	8,35
33	13,4	8,7	12,0	7,13
34	15,7	9,2	13,8	4,04
35	18,1	8,7	12,1	3,59

36	20,4	9,2	13,9	2,71
37	22,7	8,7	12,2	2,51
38	25,0	9,2	12,6	2,54
39	27,4	8,7	9,8	2,58
40	29,7	9,2	10,6	2,99
41	32,0	8,7	6,1	3,96
42	34,4	9,2	8,0	5,70
43	36,7	8,7	4,0	20,00
44	39,0	9,2	4,7	20,00
45	8,8	9,6	11,8	19,84
46	11,1	10,0	13,7	8,42
47	13,4	9,6	14,2	5,45
48	15,7	10,0	14,7	3,97
49	18,1	9,6	12,9	3,59
50	20,4	10,0	14,7	2,73
51	22,7	9,6	13,0	2,46
52	25,0	10,0	13,5	2,51
53	27,4	9,6	10,7	2,56
54	29,7	10,0	11,0	3,06
55	32,0	9,6	7,7	4,06
56	34,4	10,0	8,3	6,32
57	36,7	9,6	4,8	20,00
58	39,0	10,0	5,4	20,00
59	8,8	10,5	11,4	34,71
60	11,1	10,9	14,3	8,52
61	13,4	10,5	15,1	5,04
62	15,7	10,9	14,2	4,17
63	18,1	10,5	15,1	3,25
64	20,4	10,9	14,3	2,74
65	22,7	10,5	12,6	2,56
66	25,0	10,9	14,4	2,51
67	27,4	10,5	11,6	2,64
68	29,7	10,9	12,6	3,09
69	32,0	10,5	8,2	4,15
70	34,4	10,9	8,7	6,93
71	36,7	10,5	6,2	20,00
72	39,0	10,9	6,5	20,00
73	8,8	11,3	12,1	40,52
74	11,1	11,8	14,9	8,64
75	13,4	11,3	16,0	4,90
76	15,7	11,8	15,1	4,10
77	18,1	11,3	16,0	3,10
78	20,4	11,8	15,2	2,70
79	22,7	11,3	13,5	2,50
80	25,0	11,8	14,0	2,54
81	27,4	11,3	11,1	2,65
82	29,7	11,8	13,0	3,08
83	32,0	11,3	9,8	4,31
84	34,4	11,8	9,2	7,64
85	36,7	11,3	6,5	20,00
86	8,8	12,2	13,9	22,18
87	11,1	12,7	15,6	8,85
88	13,4	12,2	15,4	6,00
89	15,7	12,7	16,0	4,04
90	18,1	12,2	16,9	3,02
91	20,4	12,7	16,1	2,65
92	22,7	12,2	14,4	2,57
93	25,0	12,7	14,9	2,54
94	27,4	12,2	12,9	2,69

95	29,7	12,7	13,5	3,12
96	32,0	12,2	12,4	4,27
97	34,4	12,7	9,8	8,51
98	36,7	12,2	7,8	20,00
99	8,8	13,1	13,6	61,71
100	11,1	13,5	16,3	8,95
101	13,4	13,1	16,1	5,95
102	15,7	13,5	18,2	3,82
103	18,1	13,1	16,5	3,21
104	20,4	13,5	17,0	2,62
105	22,7	13,1	15,3	2,58
106	25,0	13,5	15,8	2,60
107	27,4	13,1	13,4	2,76
108	29,7	13,5	15,0	3,20
109	32,0	13,1	12,9	4,38
110	34,4	13,5	10,4	9,59
111	36,7	13,1	8,5	20,00
112	8,8	14,0	15,4	24,09
113	11,1	14,4	17,0	9,39
114	13,4	14,0	16,8	5,86
115	15,7	14,4	17,7	4,10
116	18,1	14,0	17,3	3,07
117	20,4	14,4	17,8	2,61
118	22,7	14,0	16,2	2,59
119	25,0	14,4	16,7	2,63
120	27,4	14,0	13,9	2,83
121	29,7	14,4	14,5	3,31
122	32,0	14,0	12,4	4,69
123	34,4	14,4	12,0	7,05
124	36,7	14,0	9,2	20,00
125	39,0	14,4	9,2	20,00
126	11,1	15,3	17,7	9,53
127	13,4	14,9	17,5	5,72
128	15,7	15,3	18,6	4,30
129	18,1	14,9	19,5	2,94
130	20,4	15,3	18,7	2,72
131	22,7	14,9	17,0	2,60
132	25,0	15,3	17,3	2,65
133	27,4	14,9	14,5	2,85
134	29,7	15,3	15,0	3,42
135	32,0	14,9	13,0	4,79
136	34,4	15,3	12,6	7,64
137	36,7	14,9	9,9	20,00
138	13,4	15,7	19,4	4,88
139	18,1	15,7	19,1	2,99
140	22,7	15,7	17,9	2,61
141	27,4	15,7	16,1	2,88
142	32,0	15,7	14,6	4,77
143	36,7	15,7	10,6	20,00
=====				

Condizione Sismica Superficie con coefficiente minimo



Proprietà Coordinate Maglia centri Opere di intervento
Carichi Vincoli Opzioni di analisi **Sintesi calcolo**

Sintesi calcolo

Superfici calcolate 143

SF Min, SF Max 2,17 264,58

Ricalcola

Xc	Yc	Rc	Ps
25,044	7,3912	9,6413	2,1664

Intervalli di visualizzazione

☒ Superficie a fattore minimo

☐ Superfici calcolate

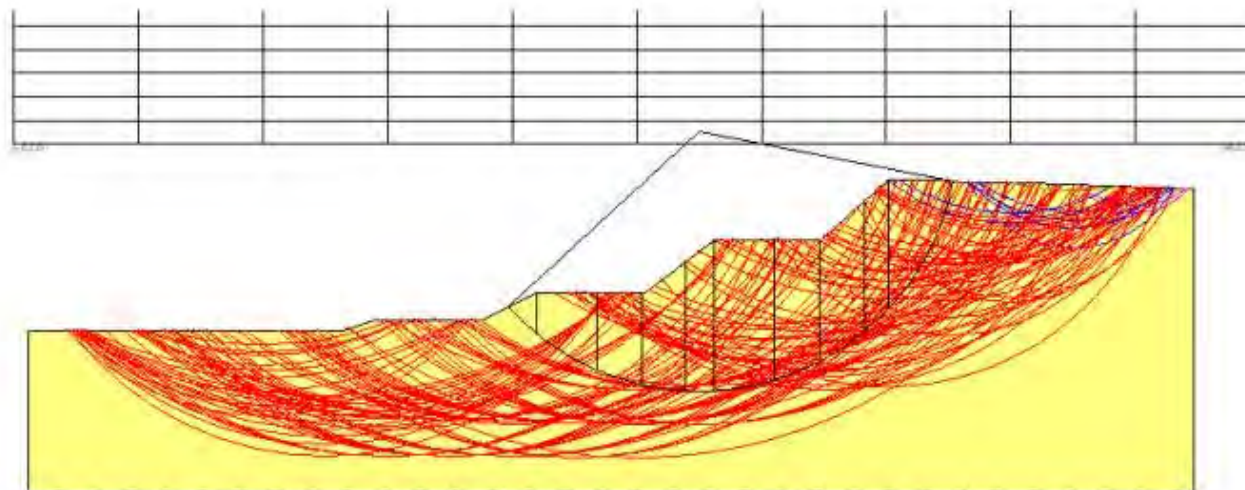
☐ Superfici da visualizzare

☐ 2,17 - 46,07 ☐ 46,07 - 89,97

☐ 89,97 - 133,87 ☐ 133,87 - 177,77

☐ 177,77 - 221,68 ☐ 221,68 - 265,58

Condizione Sismica Superfici calcolate



Proprietà Coordinate Maglia centri Opere di intervento
Carichi Vincoli Opzioni di analisi **Sintesi calcolo**

Sintesi calcolo

Superfici calcolate 143

SF Min, SF Max 2,17 264,58

Ricalcola

Xc	Yc	Rc	Ps
25,044	7,3912	9,6413	2,1664

Intervalli di visualizzazione

☐ Superficie a fattore minimo

☒ Superfici calcolate

☐ Superfici da visualizzare

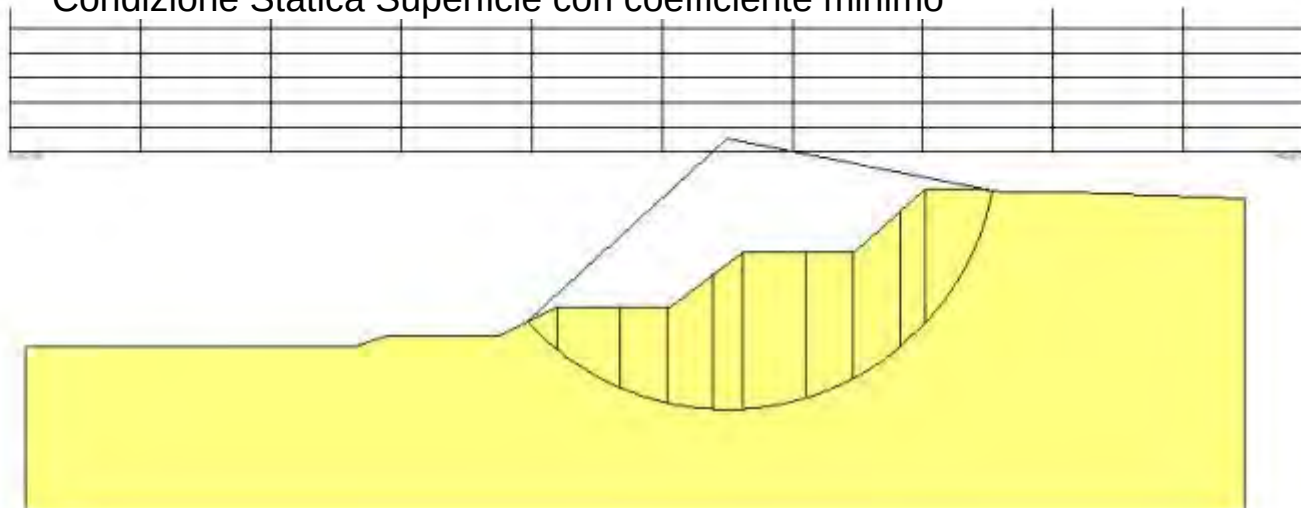
☐ 2,17 - 46,07 ☐ 46,07 - 89,97

☐ 89,97 - 133,87 ☐ 133,87 - 177,77

☐ 177,77 - 221,68 ☐ 221,68 - 265,58

Verifica di stabilità in condizione sismica

Condizione Statica Superficie con coefficiente minimo



Proprietà	Coordinate	Magia centri	Opere di intervento
Carichi	Vincoli	Opzioni di analisi	Sintesi calcolo

Sintesi calcolo

Superfici calcolate: 143

SF Min, SF Max: 2,42 61,71

Ricalcola

Xc	Yc	Rc	Fs
25,044	7,3912	9,6413	2,4200

Intervalli di visualizzazione

☒ Superficie a fattore minimo

☐ Superfici calcolate

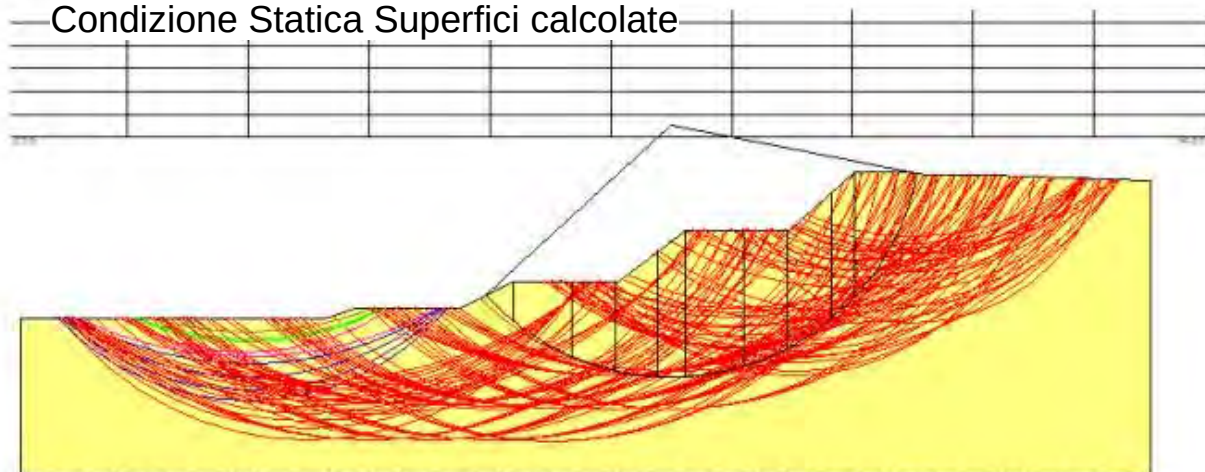
☐ Superfici da visualizzare

☐ 2,42 - 12,47 ☐ 12,47 - 22,52

☐ 22,52 - 32,57 ☐ 32,57 - 42,62

☐ 42,62 - 52,66 ☐ 52,66 - 62,71

Condizione Statica Superfici calcolate



Proprietà	Coordinate	Magia centri	Opere di intervento
Carichi	Vincoli	Opzioni di analisi	Sintesi calcolo

Sintesi calcolo

Superfici calcolate: 143

SF Min, SF Max: 2,42 61,71

Ricalcola

Xc	Yc	Rc	Fs
25,044	7,3912	9,6413	2,4200

Intervalli di visualizzazione

☐ Superficie a fattore minimo

☒ Superfici calcolate

☐ Superfici da visualizzare

☐ 2,42 - 12,47 ☐ 12,47 - 22,52

☐ 22,52 - 32,57 ☐ 32,57 - 42,62

☐ 42,62 - 52,66 ☐ 52,66 - 62,71

Verifica di stabilità in condizione sismica