



ASSESSORATO DELL'INDUSTRIA



studio geologico associato

Dott. geol. Gianfranco Piras

P.zza Virchow, 2
09121 CAGLIARI
Tel. 070-500482 Fax 070-5511161

Comune di BUSACHI

Provincia di Oristano

Progetto di coltivazione, ampliamento
e ripristino di una cava di materiale per costruzioni
e opere civili ubicata in località
"Tanca Santa Marra"

03/2023

RELAZIONE GEOLOGICA

IL PROGETTISTI

Dott. Geol. Gianfranco Piras

COLLABORATORI

Dott. Geol. Barbara Chia

COMMITTENTE

CAVA TIRSO s.n.c.
Fordongianus (OR)

RELAZIONE GEOLOGIA

NORMATIVA DI RIFERIMENTO

- **Decreto 17 Gennaio 2018 e circolare applicativa 2019**
Ministero delle infrastrutture e trasporti – Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni
- **Decreto Ministeriale 14.01.2008**
Testo Unitario - Norme Tecniche per le Costruzioni
- **Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici**
Istruzioni per l'applicazione delle "Norme tecniche per le costruzioni" di cui al D.M. 14 gennaio 2008.
- Circolare 2 febbraio 2009.
- **Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici**
Pericolosità sismica e Criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale. Allegato al voto n. 36 del 27.07.2007
- **Eurocodice 8 (1998)**
Indicazioni progettuali per la resistenza fisica delle strutture
Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti geotecnici (stesura finale 2003)
- **Eurocodice 7.1 (1997)**
Progettazione geotecnica – Parte I : Regole Generali . - UNI
- **Eurocodice 7.2 (2002)**
Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita da prove di laboratorio (2002). UNI
- **Eurocodice 7.3 (2002)**
Progettazione geotecnica – Parte II : Progettazione assistita con prove in sito(2002). UNI
- **Leggi regionali in materia di pianificazione e di Vincolo Idrogeologico**
- **Ordinanze Autorità di Bacino nazionale, regionale o interregionale**
- **Piani Territoriali di coordinamento (Province)**
- **Piano Strutturale e Regolam. Urbanistico**
- **D.M. 11.03.1988**

Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione.

PREMESSA

Si redige la presente relazione geologica a corredo del progetto aggiornamento e ampliamento di coltivazione e ripristino della cava Santa Marra, ubicata in agro del Comune di Ghilarza di proprietà della Ditta Cava Tirso Snc.

Inquadramento geografico

L'area complessiva in disponibilità della Cava Tirso SNC, ricade nei catastali del Comune di Busachi al Foglio: 15 mappali 28-29 parte- 61-112 parte-121-123-124-126- 127- 128 parte -129 ed ha una superficie di 14.37.72 Ha. In particolare i mappali già autorizzati ricadono nei mappali 28, 61, 110, 112, 121 parte, 126, 127, 128 parte, 129 per una superficie pari a circa 12,3 Ha, mentre la porzione di cui si chiede l'ampliamento riguarda i mappali 29 parte, 123, 124 per una superficie di circa 1,72 Ha. La restante porzione del mappale 112 è quella che ricade in corrispondenza del limite con il SIC, la quale è stata completamente esclusa dalla coltivazione e nella quale sono rivolti esclusivamente interventi di ripristino e rivegetazione, per una superficie di circa 1,3 Ha.

Inquadramento Geologico - Geomorfologico

L'area si inserisce nel contesto morfologico del Plateau strutturale di Abbasanta-Paulilatino caratterizzato dall'alternanza di colate basaltiche con spessori variabili. Le lave basaltiche hanno ricoperto quasi completamente la successione vulcano-sedimentaria neogenica, inserendosi in una situazione morfologica già evoluta. L'area in esame si presenta come una grande piana, con quote medie di 200-250 metri di altitudine, che decrescono spostandosi nel settore orientale. Le forme dominanti del paesaggio sono le cornici che orlano i bordi dei grandi espandimenti basaltici plio-quadernari. Questa zona risulta depressa rispetto al settore occidentale, a causa dell'erosione operata dal fiume Tirso, emissario del lago Omodeo, che qui scorre con direzione N-S, e ha approfondito notevolmente il suo letto a spese delle arenarie mioceniche.

L'area di cava interessata dai lavori di coltivazione è caratterizzata dalla presenza di litotipi riferibili ai complessi litologici, appartenenti al Complesso Paleozoico, complesso vulcano sedimentario neogenico marino e continentale.

La successione vulcano-sedimentaria neogenica, che poggia sul basamento cristallino paleozoico, è caratterizzata dalla messa in posto delle vulcaniti calco-alcaline, costituite da colate e coltri ignimbriche con intercalazioni tufacee fra una colata e la successiva.

Il ciclo sedimentario post-ignimbrico inizia con la deposizione di sabbioni e conglomerati a stratificazione generalmente parallela e localmente incrociata. La base della successione è rappresentata da depositi in facies deltizia, costituiti da sabbioni rossastri prevalentemente quarzosi con intercalazioni conglomeratiche ad elementi di metamorfiti e graniti paleozoici e da rare vulcaniti. Questo livello presenta granulometria da media a grossolana (da 2-3 mm ad 1 cm) crescente da ovest verso est, dove sono presenti facies anche molto grossolane caratterizzate da blocchi granitici con diametri dell'ordine anche di 2 m. Il sedimento si presenta mal classato, con clasti costituiti da feldspato rosa, quarzo e da elementi metamorfici, in percentuali pressoché uguali. I clasti si presentano da spigolosi a smussati da est verso ovest, ma senza mai raggiungere un indice di maturità elevato. Il cemento è di natura argillosa.

La formazione arenacea è conosciuta come Arenarie di Dualchi. Si tratta in particolare di sabbioni conglomeratici rossastri e grigiastri, ad elementi paleozoici e vulcanici, localmente fossiliferi (scarsi e piccoli pettinidi), passanti verso l'alto a conglomerati fossiliferi. La loro datazione è attribuibile ad un periodo compreso al Burdigaliano Inf.-Medio.

In questi sedimenti si sviluppò una flora caratteristica degli ambienti climatici della savana costituita interamente da *Palmoxylon thyrrenicum* CHIAR., *Dombeyoxylon oweni* (CARR) KRAUS., *Laurinoxylon desioi* CHIAR. e *Robinioxylon zuriensis* FALQUI, nota in letteratura come foresta fossile di Zuri.

La foresta è stata fossilizzata dalle successive eruzioni vulcaniche a carattere esplosivo, che con la deposizione di sedimenti piroclastici, da cineritici a pomicei, hanno ricoperto lo strato vegetale determinandone la pseudomorfosi per silicizzazione.

La sequenza piroclastica è caratterizzata da tufi cineritici da grigi ad avana, con bancate più francamente pomicee e livelli conglomeratico-sabbiosi intercalati.

Alla fase eruttiva segue una nuova fase sedimentaria costituita essenzialmente da livelli conglomeratico-arenacei ed argillosi appartenenti a facies fluvio-lacustre e fluviodeltizia, passante a litorale.

Questi sedimenti risultano costituiti da una sabbia da media a molto grossolana di colore variante dal grigio, al bianco ed al rossastro. I clasti, costituiti da elementi di scisti, graniti, porfidi e quarzo, paleozoici, e da rarissimi elementi di ignimbriti terziarie, presentano una classazione da est verso ovest e da nord verso sud, così come nello stesso modo aumenta la frazione fine.

I livelli francamente arenacei si presentano frequentemente incoerenti, solo localmente in bancate molto compatte delle spessore variabile da 50 cm ad 1 m.

All'interno di questo sedimento si trovano frammenti di legno silicizzato, appartenente alla vegetazione fossilizzata sottostante.

Localmente fra i sedimenti miocenici e le colate basaltiche si trovano sottili strati arenacei sterili, potenti da 1 a 2 m, di alluvioni plioceniche.

I basalti soprastanti, in colate successive, in giacitura poco inclinata, con immersioni verso verso SO o suborizzontale, dislocati da faglie di età successiva, sono il prodotto del vulcanismo alcalino, sviluppatosi in conseguenza della fase tettonica distensiva plio-quadernaria. Questo vulcanismo, responsabile dell'apertura del graben campidanese, ha dato luogo a massicci vulcanici composti, di grandi dimensioni, come il Montiferru ed il Monte Arci e a vasti "plateaux basaltici" come Campeda, Planargia, Abbasanta-Paulilatino, Gesturi ed altri ancora.

I basalti in oggetto, afferenti la Subunità di Dualchi (BASALTI DELLA CAMPEDA-PLANARGIA) sono costituiti invero, da Andesiti basaltiche subalcaline, porfiriche per fenocristalli di Pl, Cpx, Opx, Ol; in estesi espandimenti, Trachibasalti e basalti debolmente alcalini, porfirici per fenocristalli di Pl, Ol, Cpx; in estesi espandimenti e sono databili tra il Pliocene Medio-Sup.ed il Pleistocene Inf.

La roccia e' caratterizzata da una colorazione grigio scura se sana, e tendente a bruno e bruno-rossastro in corrispondenza delle fasce più bollose di tetto e dei settori più alterati. Lo strato superficiale, potente mediamente 0.50 m risulta mediamente alterato.

Questo strato, con la sottile cotica di suolo vegetale costituisce il cappellaccio.

Geologia di dettaglio dell'area di intervento

Il rilievo di dettaglio riassunto nella Tavola 9, ha permesso di evidenziare le litologie affioranti e di osservarne le variazioni laterali e verticali grazie agli scavi presenti. I tipi litologici individuati nell'area sono costituiti principalmente da basalti e solo localmente, e nelle porzioni più depresse, dove localmente è stata asportata una parte della roccia, si rinvencono orizzonti arenacei e sabbie, da fini a grossolane. Nelle sabbie sono presenti lenti di materiale piroclastico (tufi) alterato e livelli di argilla. Questi depositi detritici vengono scavati con soli mezzi meccanici quali escavatori e benne, con la creazione di piccole fosse attigue. In alcune di queste fosse ristagnano le acque meteoriche, dovute alla presenza di argilla che funge da letto impermeabile. Il materiale estratto, costituito prevalentemente da basalti più o meno compatti con granulometria da media a grossolana, si presenta con spigoli generalmente vivi e con ottime caratteristiche geomeccaniche.

Idrogeologia

La presenza in tutto il settore di grandi espandimenti basaltici, le caratteristiche delle formazioni sottostanti costituite da alternanze di arenarie, arenarie marnose con intercalazioni di livelli ad elevato contenuto di argille e tufi, indicano per questa zona una bassa permeabilità.

I basalti di copertura sono infatti in gran parte impermeabili, l'unica possibilità di infiltrazione è data dalla fessurazione prismatica di queste lave.

La generale impermeabilità è testimoniata tra l'altro dalla presenza di una zona paludosa e dalla scarsità di sorgenti nella piana. Sorgenti che invece sono numerose nei versanti del fiume Tirso, sotto il contatto tra basalti e arenarie.

Queste emergenze sono probabilmente alimentate da acque che penetrando in zone dove la copertura basaltica è fessurata, circolano negli orizzonti costituiti in prevalenza da sabbie poco cementate e conglomerati e vengono a giorno in corrispondenza dei livelli impermeabili delle intercalazioni argillose.

Caratteristiche geotecniche

Sulle litologie oggetto di estrazione sono state eseguite delle prove geotecniche, di seguito riassunte:

litologia	prove	risultati
basalti	Compressione semplice	➤ 800 - 2000 kg/cmq
	Peso di volume	2.2-2.85 g/cmq
	Angolo di attrito	38-48°
	Umidità naturale	5-15%
Sabbie, conglomerati e argille	Classificazione UNI	
sabbie		Classe A3 frazione passante al setaccio 0.075 UNI 2332, oscillata il 4.5% e l' 8.2%
argille		Classe A7-6 fortemente plastiche e compressibili (L.L.= 42, I.P.=20),

In riferimento alla classificazione di Beniaowski l'ammasso roccioso, lo possiamo considerare appartenente alla CLASSE II, così come illustrato nella tabella seguente:

C.S.I.R. Rock Mass Rating 1989: rilievo geomeccanico n.1

1	Resistenza alla compressione uniassiale (MPa)	Punteggio	2	R.Q.D. %	Punteggio	3	Spaziatura media(cm)	Punteggio
	800	11		80	16		100	14
PARAMETRI		INTERVALLI DI VALORI						
4	Condi zione giunti	Lunghezza giunti (m)	< 1	1 - 3	3 - 10	10 - 20	> 20	
		Punteggio	6	4	2	1	0	
		Apertura (mm)	Nessuno	< 0.1	0.1 - 1.0	1 - 5	> 5	
		Punteggio	6	5	4	1	0	
		Rugosità	Molto rugosi	Rugosi	Leg.rugosi	Lisci	Levigati	
		Punteggio	6	5	3	1	0	
		Riempimento (mm)	Nessuno	<5 riempimento duro	>5 riempimento duro	<5 riempimento molle	>5 riempimento molle	
		Punteggio	6	4	2	2	0	
5	Acque sotter ranee	Alterazione	Non alterato	Leg.alterato	Mod.alterato	Molto alterato	Decomposto	
		Punteggio	6	5	3	1	0	
		Portata per 10 m di lunghezza (l/min)	None	< 10	10 - 25	25 - 125	> 125	
		Rapporto (pressione acqua nei giunti) / (sforzo principale)	0	< 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5	
		Condizioni generali	Asciutti	Umidi	Bagnati	Gocciolanti	Venute	
6	Punteggio	Punteggio	15	10	7	4	0	
		Orientamento dei giunti	Molto favorevole	Favorevole	Discreta	Sfavorevole	Molto sfavorevole	
		Gallerie	0	-2	-5	-10	-12	
		Fondazioni	0	-2	-7	-15	-25	
		Scarpate	0	-5	-25	-50	-60	

CLASSE	BRMR	RMR	GSi	DESCRIZIONE	COESIONE	Angolo attrito
II	70	68	65	BUONA	350 KPa	40°

Verifica stabilità versanti

Per la verifica della stabilità dei fronti di scavo sono stati eseguiti i calcoli analizzando i fronti nella situazione dello stato di coltivazione. In particolare è stata presa in considerazione la sezione tipo che dal punto di vista morfologico rappresenta la situazione più critica (vedasi planimetria allegata). Considerando inoltre la presenza di un certo grado di fatturazione e alterazione dei litotipi interessati sono stati scelti per il calcolo, come valori per i parametri geotecnici, quelli più cautelativi. Per la presente analisi è stato utilizzato l'applicativo BRock del Software della ProgramGeo.

La procedura di analisi di stabilità del pendio in roccia è stata eseguita attraverso la valutazione dell'equilibrio limite, che consiste nella stima di un coefficiente di sicurezza alla traslazione e/o alla rotazione del volume di terra compreso fra la superficie del versante ed una superficie di taglio potenziale imposta. La procedura di calcolo prende in considerazione tutte le forze e/o i momenti agenti lungo il piano di taglio, fornendo una valutazione della stabilità globale attraverso le equazioni d'equilibrio fornite dalla statica.

Il coefficiente di sicurezza globale del pendio viene calcolato attraverso il rapporto fra la resistenza di taglio massima disponibile lungo la superficie di rottura e gli sforzi tangenziali mobilitati lungo tale piano:

$$F_{sic} = T_{max} / T_{mob};$$

con

F_{sic} = coefficiente di sicurezza;

T_{max} = resistenza di taglio massima;

T_{mob} = sforzo tangenziale mobilitato.

All'equilibrio ($T_{max} = T_{mob}$) F_{sic} deve essere ovviamente uguale a 1.

Il pendio potrebbe essere considerato in teoria stabile, quando F_{sic} risulta maggiore di 1 ($T_{max} > T_{mob}$), instabile in caso contrario ($T_{max} < T_{mob}$). In realtà, per tener conto dell'incertezza introdotta dalle ipotesi semplificatrici nella procedura di calcolo e soprattutto dell'approssimazione con cui sono noti i parametri geotecnici del terreno, per Legge (D.M.21.1.81 e successivi) e per consuetudine pratica, la stabilità può dirsi raggiunta solo nel caso in cui F_{sic} sia maggiore di **1.3**.

Si distinguono quindi tre casi:

a) Coefficiente di sicurezza inferiore a 1: il pendio si trova in condizioni di instabilità globale.

b) Coefficiente di sicurezza compreso fra 1 e 1.3: il pendio si trova in condizioni prossime all'equilibrio limite; anche un piccolo incremento degli sforzi tangenziali sulla superficie potenziale di rottura può innescare il fenomeno franoso.

c) Coefficiente di sicurezza superiore a 1.3: il pendio si trova in condizioni di stabilità globale.

Negli ammassi rocciosi la resistenza al taglio del materiale non può generalmente essere descritta con il criterio di rottura di Coulomb, per il quale:

$$\tau_{\max} = c + \sigma \tan \varphi;$$

dove

c = coesione;

σ = pressione efficace;

φ = angolo d'attrito.

Questo infatti indica una correlazione fra resistenza al taglio del materiale e pressione di confinamento di tipo lineare, mentre negli ammassi rocciosi tale correlazione è chiaramente di tipo non lineare.

D'altra parte i metodi dell'equilibrio limite per il calcolo della portanza richiedono che il materiale, terra o roccia, sia descrivibile attraverso i parametri c e φ .

E' necessaria quindi una correlazione che leghi queste due grandezze a quelle utilizzate normalmente per la descrizione del comportamento meccanico dell'ammasso roccioso.

Hoek e Brown descrivono una procedura che consente l'applicazione delle formule dell'equilibrio limite anche al caso di ammassi rocciosi.

La forma generale del criterio di rottura di Hoek & Brown è la seguente:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left[m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right]^a;$$

dove:

m_b = valore della costante m per gli ammassi rocciosi;

$s, a =$	costanti dipendenti dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso;
$\sigma_c =$	resistenza alla compressione monassiale della roccia intatta;
$\sigma_1 \sigma_3 =$	sforzi principali in tensioni efficaci.

La determinazione dei parametri a , s e m_b viene fatta in funzione della qualità dell'ammasso roccioso, espressa numericamente dall'indice GSI (Geological Strength Index).

Sulla base del valore stimato dell'indice GSI, si distinguono i seguenti casi:

- per ammassi rocciosi in condizioni indisturbate di qualità da buona a media per i quali sia $GSI \geq 25$, si ha:

$$a = 0.5;$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right);$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right);$$

- per ammassi rocciosi in condizioni indisturbate per i quali sia $GSI < 25$ (ma maggiore di 18, valore minimo previsto dalla classificazione), si ha:

$$a = 0.65 - \frac{GSI}{200};$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right);$$

$$s = 0;$$

- in tutti i casi in condizioni rimaneggiate o disturbate (ammassi rocciosi scavati con esplosivo o alterati e detensionati), si ha:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{14}\right);$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{6}\right) \text{ (solo nel caso } GSI \geq 25, \text{ altrimenti } s=0);$$

Per quanto riguarda la stima dei valori di m_i , costante per i diversi litotipi, in assenza di dati sperimentali, si può fare riferimento alla seguente tabella:

ROCCE	CLASSE	GRUPPO	GRANULOMETRIA			
			GROSSA	MEDIA	FINE	MOLTO FINE
SEDIMENTARIE	CLASTICHE		CONGLOMERATO 22	ARENARIA 19	SILTITE 9	ARGILLITE 4
			<----- GROVACCA -----> 18			
	NON CLASTICHE	ORGANICHE	<----- CALCARE -----> 7 <----- CARBONE -----> 8-21			
		CARBONATICHE	BRECCIA 20	CALCARE SPARITICO 10	CALCARE MICRITICO 8	
		CHIMICHE		GESSO 16	ANIDRITE 13	
	METAMORFICHE	NON SCISTOSE		MARMO 9	HOMFELS 19	QUARZITE 24
DEBOLMENTE SCISTOSE		MIGMATITE 30	ANFIBOLITE 31	MILONITE 6		
SCISTOSE		GNEISS 33	SCISTI 10	FILLITE 10	ARGILLOSCISTO 9	
IGNEE	ACIDE		GRANITO 33		RIOLITE 16	OSSIDIANA 19
			GRANODIORITE 30		DACITE 17	
			DIORITE 28		ANDESITE 19	
			GABBRO 27	DEFERITE 19	BASALTO 17	
			NORITE 22			
	PIROCLASTICHE		AGGLOMERATO 20	BRECCIA 18	TUFO 15	

Stima dei valori di c_i e φ_i dell'ammasso roccioso.

Poiché il criterio di Hoek e Brown esprime una curva di tipo non lineare, i valori di coesione e angolo di resistenza al taglio variano in funzione dello sforzo normale efficace (σ_n') agente sulla base del concio.

I valori di c_i e φ_i si possono ottenere attraverso lo sviluppo di una tecnica numerica per la soluzione in forma implicita. In questo caso i passi di calcolo sono i seguenti:

- con le procedure di Hoek e Brown, si calcolano i valori di σ_1 , facendo variare σ_3 da un valore minimo prossimo a 0 fino ad un valore massimo che può essere posto indicativamente uguale a $0,25\sigma_c$. Il passo di variazione di σ_3 ($\Delta\sigma_3$) è fornito dalla relazione $\Delta\sigma_3 = \sigma_c/2^{10}$. Ad n passi $\Delta\sigma_3$ corrispondono altrettante coppie di valori di σ_1 , σ_3 , con le formule di Hoek e Brown, e n gruppi di valori $\delta\sigma_1/\delta\sigma_3$, σ_n' , τ , ottenuti attraverso le relazioni di Balmer:

$$\sigma_n = \sigma_3 + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\frac{\delta\sigma_1}{\delta\sigma_3} + 1};$$

$$\tau = (\sigma_n - \sigma_3) \sqrt{\frac{\delta\sigma_1}{\delta\sigma_3}};$$

$$\frac{\delta\sigma_1}{\delta\sigma_3} = 1 + \frac{m_b \sigma_c}{2(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (\text{caso } GSI > 25, a=0,5).$$

$$\frac{\delta\sigma_1}{\delta\sigma_3} = 1 + am_b^a \left(\frac{\sigma_3}{\sigma_c} \right)^{a-1} \quad (\text{caso } GSI \leq 25, s=0).$$

Dalle formule di regressione lineare:

$$\varphi_i' = \arctan \left[\frac{\sum \sigma_n \tau - \frac{\sum \sigma_n \sum \tau}{n}}{\sum \sigma_n^2 - \frac{(\sum \sigma_n)^2}{n}} \right],$$

$$c_i' = \left(\frac{\sum \tau}{n} \right) - \left[\left(\frac{\sum \sigma_n}{n} \right) \tan \varphi_i' \right],$$

si ricavano i corrispondenti valori di c_i' e φ_i' dell'intervallo considerato.

- S'individua l'intervallo di valori di σ_n calcolati nel passo precedente ($\Delta\sigma_n$) nel quale ricade il σ_n' medio della base del concio. $\Delta\sigma_n$ a sua volta si collega a due

intervalli di variazione della coesione e dell'angolo di resistenza al taglio istantanei ($\Delta c_i'$ e $\Delta \varphi_i'$), da cui si ricavano:

$$c_i = \frac{\sigma_{nbc}'}{\Delta \sigma_n} \Delta c_i',$$

$$\varphi_i = \frac{\sigma_{nbc}'}{\Delta \sigma_n} \Delta \varphi_i',$$

Risoluzione con i metodi dell'equilibrio limite

Le instabilità di interi versanti o di importanti parti di versanti in roccia, avvengono per superfici circolari o subcircolari solo in presenza delle seguenti caratteristiche geostrutturali e geomeccaniche:

- Pendio costituito da rocce altamente fratturate fino a cataclasate (“waste or crushed rock mass”), con comportamento a grande scala tendenzialmente simile a quello dei terreni e discontinuità non isorientate (“random”) in cui si verificano le condizioni:
 - basso grado di “interlocking” ovvero di intercompenetrazione e reciproco incastro dei volumi rocciosi unitari determinati dalle superfici di discontinuità
 - dimensioni dei volumi rocciosi unitari isolati dalle discontinuità, trascurabili nei confronti delle dimensioni del pendio. Questa situazione si verifica nei confronti dei versanti fortemente estesi in rapporto al reticolo fratturativo presente; si tratta quindi di un fenomeno che risente in maniera piuttosto evidente del decadimento delle caratteristiche di resistenza per il cosiddetto “effetto scala”. Tale fenomeno contraddistingue i cosiddetti “sackung” (“Deep Seated Mass Rock Creep”) che consistono in frane di versante di grosse dimensioni.
- Pendio costituito da rocce con una o più famiglie di superfici di discontinuità geostrutturale-geomeccanica disposte sfavorevolmente alla giacitura del pendio o con direzione prossima alla stessa. Le superfici di discontinuità geostrutturale-geomeccanica possono essere di origine singenetica, tettonica o metamorfica (o post-tettonica o post-metamorfica) e possono essere inclinate in qualsiasi modo rispetto al pendio purché la loro direzione sia prossima allo stesso ($\pm 20^\circ$ da “*Rock Slope Engineering*”) ovvero le superfici siano “cinematicamente ammissibili”. E’ il caso prevalentemente considerato nella presente trattazione.

- Pendio costituito da rocce tenere e/o suoli molto compatti e sovraconsolidati dove il comportamento complessivo a grande scala è quello rispettivamente di un mezzo omogeneo isotropo continuo e dei terreni.
- Pendio costituito da rocce completamente alterate dai fenomeni di “*weathering*” dove il comportamento è quello dei terreni.

Metodi utilizzati nell'analisi

Nell'analisi sono stati utilizzati i metodo di Fellenius, Bishop e Janbu semplificato.

Metodo di Fellenius

Con il metodo di Fellenius si pone la condizione che le forze agenti sulle superfici di separazione dei conci (forze di interstriscia) siano trascurabili.

E' un metodo basato sull'equilibrio dei momenti agenti.

Posto:

$$N_i = W_{\text{concio}(i)} \cos \alpha_i;$$

con

$W_{\text{concio}(i)}$ = peso del volume di terra compreso nel concio i-esimo;

α_i = inclinazione della base del concio i-esimo;

N_i = componente normale alla base del concio di $W_{\text{concio}(i)}$.

Imponendo l'equilibrio dei momenti rispetto al centro della superficie circolare di scivolamento potenziale del pendio, si può scrivere:

$$\sum R \sin \alpha_i W_{\text{concio}(i)} = \sum R T_i;$$

in cui il prodotto $R \sin \alpha_i$ rappresenta il braccio di $W_{\text{concio}(i)}$.

Si ottiene infine:

$$F_{\text{sic}} = \frac{\sum (C_i L_{\text{concio}(i)} + N_i \tan \phi_i)}{\sum \sin \alpha_i W_{\text{concio}(i)}};$$

con

C_i =coesione agente lungo la base del concio i ;

$L_{\text{concio}(i)}$ =lunghezza della base del concio i ;

φ_i =angolo d'attrito agente lungo la base del concio i ;

Introducendo il contributo dovuto alla presenza di falda idrica si ottiene:

$$F_{\text{sic}} = \sum C_i L_{\text{concio}(i)} + (N_i - h_{\text{falda}(i)} L_{\text{concio}(i)}) \tan \varphi_i / \sum W_{\text{concio}(i)} \sin \alpha_i ;$$

in cui:

$h_{\text{falda}(i)}$ =altezza della falda rispetto alla base del concio i ;

Metodo di risoluzione di Bishop (semplificato).

Con il metodo di Bishop semplificato si pone la condizione che le forze verticali agenti sulle superfici di separazione dei conci siano trascurabili. Di conseguenza i conci interagiscono fra di loro solo attraverso forze orientate lungo l'orizzontale.

E' anche questo un metodo basato sull'equilibrio dei momenti agenti.

Viene supposto che la superficie potenziale di scivolamento sia circolare.

La resistenza al taglio massima disponibile lungo la superficie potenziale di rottura e' data, per ogni concio da:

$$T_i \max = X_i / (1 + Y_i / F_s);$$

$$\text{con } X_i = (c + (g \times h - g_w \times h_w) \times \tan \varphi) \times dx / \cos \alpha$$

con g_w = peso di volume dell'acqua;

h_w = altezza dell'acqua sulla base del concio;

dx = lunghezza del concio lungo l'orizzontale;

α = inclinazione del concio sull'orizzontale.

$$Y_i = \tan \alpha \times \tan \varphi$$

La resistenza al taglio mobilitabile lungo il piano di taglio e' per ogni concio data da:

$$T_i \text{ mob} = Z_i$$

$$\text{con } Z_i = g \times h \times dx \times \sin \alpha$$

Il coefficiente di sicurezza del pendio viene espresso come segue:

$$F_s = \sum_{i=1-n} T_i \max / \sum_{i=1-n} T_i \text{ mob}$$

Si noti che il coefficiente di sicurezza F_s , che e' la grandezza da determinare, viene a comparire anche al numeratore attraverso l'espressione della $T \max$. Di conseguenza non sarà possibile la determinazione diretta di F_s .

La procedura da adottare dovrà essere di tipo iterativo, fino all'ottenimento della convergenza su un valore praticamente costante di F_s .

Vi sono pertanto diversi passi da seguire:

1. si introduce un valore iniziale di F_s (per es. ottenuto applicando Fellenius) e si calcola un primo valore del coefficiente di sicurezza;
2. il nuovo valore di F_s (F_s') ottenuto viene confrontato col valore di partenza;
3. se la differenza supera un limite prefissato (es. $F_s' - F_s > 0.001$), si ritorna al passo a), inserendo, al posto del valore di partenza di F_s , il nuovo valore calcolato;
4. se la differenza rimane contenuta nel limite indicato, l'elaborazione va interrotta: il coefficiente di sicurezza cercato è F_s' .

Generalmente il procedimento richiede dalle quattro alle otto iterazioni per convergere.

Il metodo di Bishop richiede che siano, per tutti i conci, rispettate le due seguenti condizioni:

$$s' = (g \times h - g_w \times h_w - c \times \tan \alpha / F_s) / (1 + Y / F_s) > 0$$

con s' = pressione normale agente sulla base del concio;

$$\cos \alpha \times (1 + Y/F_s) > 0.2.$$

In caso contrario il metodo può condurre a valori del coefficiente di sicurezza non realistici.

Metodo di risoluzione di Janbu (semplificato).

Nel metodo di Janbu semplificato si pone la condizione che le forze verticali agenti sulle superfici di separazione dei conci siano trascurabili. Di conseguenza i singoli conci interagiscono fra di loro solo attraverso forze orientate lungo l'orizzontale.

Questo metodo, a differenza di quello di Bishop, consente di verificare superfici potenziali di scivolamento di forma qualsiasi ed è un metodo basato sull'equilibrio delle forze agenti.

La resistenza al taglio massima disponibile lungo la superficie potenziale di rottura e' data, per ogni concio, da:

$$T_i \max = X_i / (1 + Y_i / F_s);$$

$$\text{con } X_i = [c + (g \times h - g_w \times h_w) \times \tan \varphi] \times [1 + (\tan \varphi^2)] \times dx$$

con g_w = peso di volume dell'acqua;

h_w = altezza dell'acqua sulla base del concio;

dx = lunghezza del concio lungo l'orizzontale;

α = inclinazione del concio sull'orizzontale.

$$Y_i = \tan \alpha \times \tan \varphi$$

La resistenza al taglio mobilitabile lungo il piano di taglio e' per ogni concio data da:

$$T_i \text{ mob} = Z_i$$

$$\text{con } Z_i = g \times h \times dx \times \tan \alpha$$

Il coefficiente di sicurezza del pendio viene espresso come segue:

$$F_s = \sum_{(i=1-n)} T_i \max / \sum_{(i=1-n)} T_i \text{ mob}$$

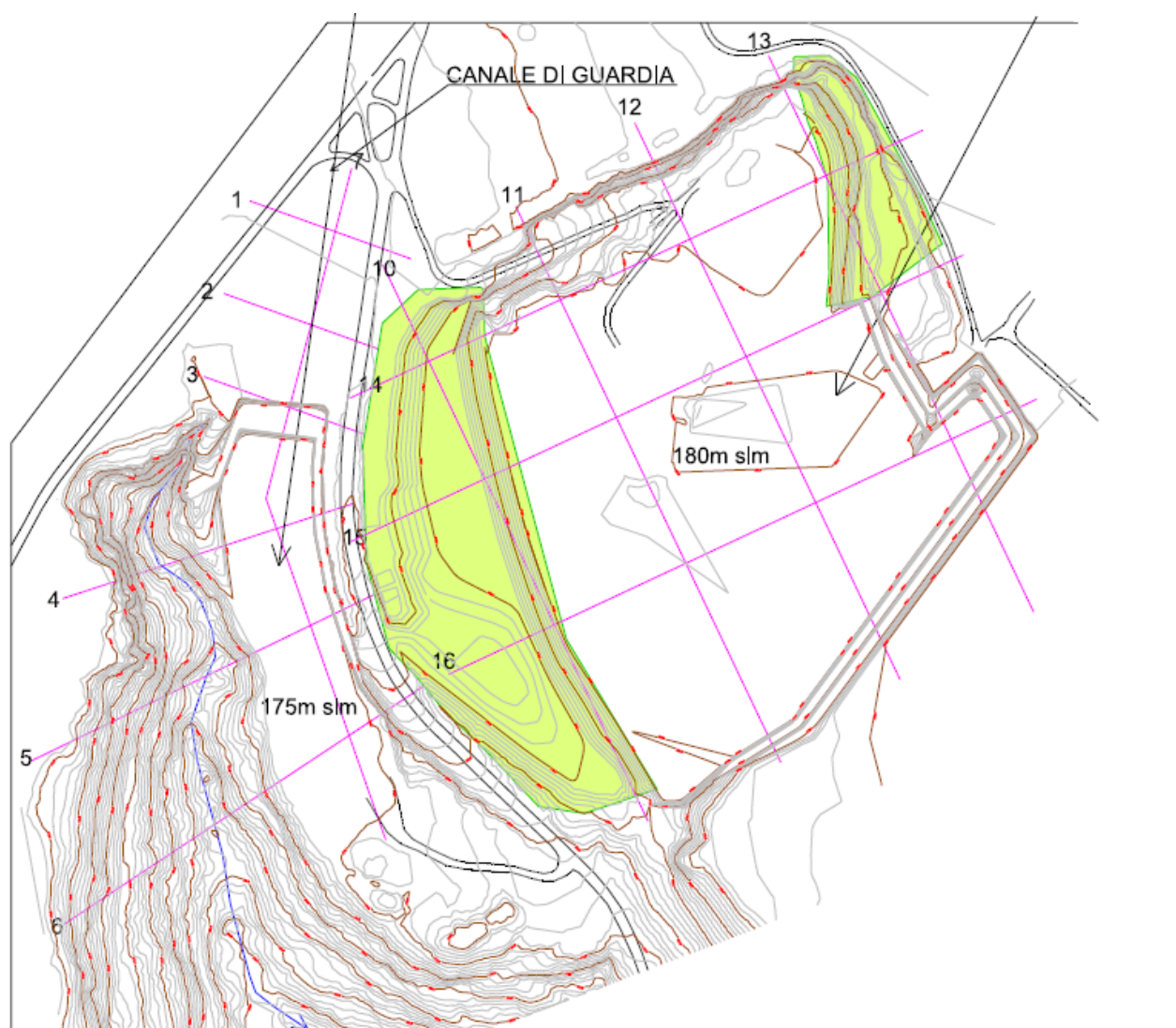
Si noti che il coefficiente di sicurezza F_s , che è la grandezza da determinare, viene a comparire anche al numeratore attraverso l'espressione della T_{max} . Di conseguenza non sarà possibile la risoluzione diretta.

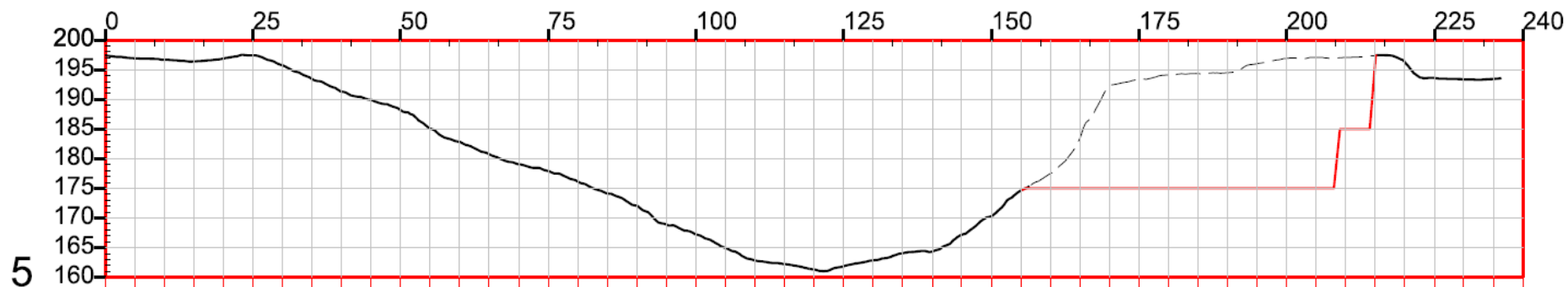
La procedura da adottare, anche in questo caso, dovrà essere di tipo iterativo fino all'ottenimento della convergenza su un valore praticamente costante di F_s .

Anche in questo caso vi sono dei passi da seguire:

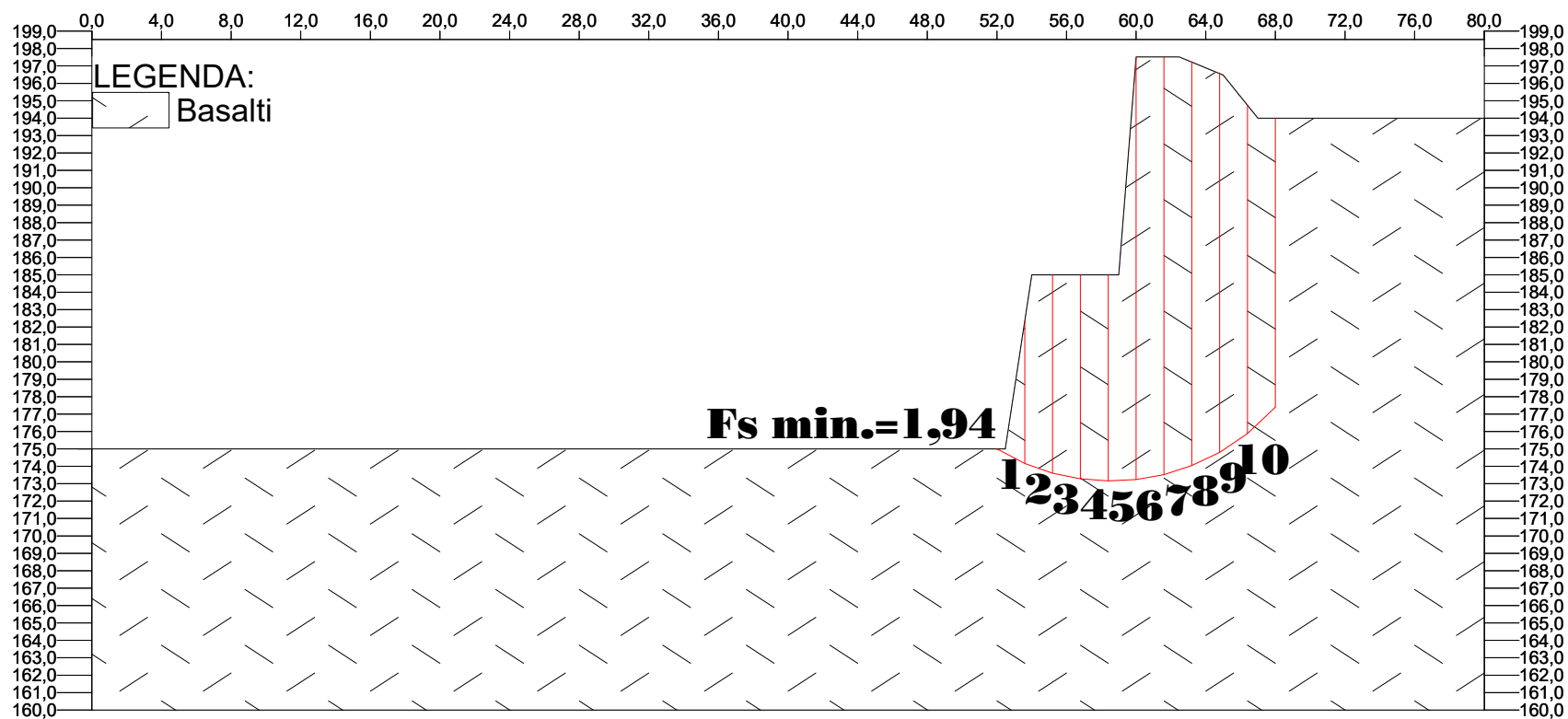
1. si introduce un valore iniziale di F_s (per es. con Fellenius) e si determina un primo valore del coefficiente di sicurezza;
2. il nuovo valore di F_s (F_s') ottenuto viene confrontato col valore di partenza;
3. se la differenza supera un limite prefissato (es. $F_s' - F_s > 0.001$), si ritorna al passo a), inserendo al posto del valore di partenza di F_s , il nuovo valore calcolato;
4. se la differenza rimane contenuta nel limite indicato, l'elaborazione va interrotta: il coefficiente di sicurezza cercato è F_s' .

La superficie con il fattore di sicurezza minimo è stata ottenuta in tutti i casi esaminati con il metodo di Jambu Semplificato, che è risultato essere il più cautelativo. La verifica sul fronte di cava in fase di coltivazione è stata eseguita sulla sezione tipo che dal punto di vista morfologico presentava le condizioni più critiche riportate nelle planimetrie allegate. I risultati hanno mostrato che il pendio in esame sotto l'azione del proprio peso, è caratterizzato da un coefficiente di sicurezza minimo allo scorrimento pari a 1,94. Sulla base delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali, sulle esperienze maturate in altre cave con analoghe caratteristiche litologiche e granulometriche e sui risultati contenuti nella presente relazione di calcolo, tenuto conto anche dei valori cautelativi inseriti, si ritiene che la verifica di calcolo sia soddisfatta. Infatti i risultati della verifica hanno fornito un coefficiente di sicurezza superiore al limite minimo accettabile per la sicurezza, posto pari a **1,3** (D.M. 81) e **1,1** (NTC 2018).





Sezione verifica fronte di scavo





Committente: Cava Tirso snc

Località: Busachi

Data: Marzo 2023

Riferimenti:

Parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso

Parametri ammasso roccioso (valori caratteristici):

Descrizione litologica:

Basalti	
Strato n.	1
G.S.I. (Geological Strength Index):	67
Indice Q della classificazione di Barton:	0
Coefficiente di Poisson:	0,2
Peso di volume sopra falda(kg/mc):	2200
Peso di volume sotto falda(kg/mc):	2200
Costante mi della roccia:	17
Resistenza compressione monassiale(kg/cm ²):	800
Modulo elastico ammasso roccioso (kg/cm ²):	235710,8
Fattore di disturbo dell'ammasso roccioso:	0,8
Caratteristiche idrogeologiche:	Livello permeabile



Committente: Cava Tirso snc

Località: Busachi

Data: Marzo 2023

Riferimenti:

Analisi di stabilità: riepilogo dei coefficienti di sicurezza

Numero	X valle m	Y valle m	X monte m	Y monte m	Fellenius	Bishop	Janbu	G.L.E.	Sarma	Spencer
1	52	175	68	194						
2	52	175	68	194						
3	52	175	68	194						
4	52	175	68	194						
5	52	175	68	194						
6	52	175	68	194	215,347	367,911	-1			
7	52	175	68	194	187,895	319,657	-1			
8	52	175	68	194	98,974	165,573	43,156			
9	52	175	68	194	89,763	149,591	44,066			
10	52	175	68	194	52,165	88,029	48,007			
11	52	175	68	194	49,112	83,087	49,412			
12	52	175	68	194	11,941	12,773	1,939			
13	52	175	68	194	11,547	12,352	1,993			
14	52	175	68	194	11,235	12,018	2,054			
15	52	175	68	194	10,911	11,67	2,109			
16	52	175	68	194	10,592	11,331	2,158			
17	52	175	68	194	10,321	11,039	2,213			
18	52	175	68	194	10,071	10,771	2,267			
19	52	175	68	194	9,83	10,512	2,319			
20	52	175	68	194	9,603	10,267	2,369			
21	52	175	68	194	9,391	10,039	2,419			
22	52	175	68	194	9,182	9,812	2,467			
23	52	175	68	194	9,02	9,637	2,523			
24	52	175	68	194	8,873	9,478	2,58			
25	52	175	68	194	8,702	9,293	2,627			
26	52	175	68	194	8,549	9,128	2,675			
27	52	175	68	194	8,412	8,979	2,727			
28	52	175	68	194	8,272	8,826	2,774			
29	52	175	68	194	8,158	8,701	2,827			
30	52	175	68	194	8,024	8,555	2,869			
31	52	175	68	194	7,91	8,431	2,918			
32	52	175	68	194	7,821	8,331	2,973			
33	52	175	68	194	7,723	8,224	3,023			
34	52	175	68	194	7,618	8,109	3,066			
35	52	175	68	194	7,543	8,024	3,121			
36	52	175	68	194	7,466	7,938	3,174			
37	52	175	68	194	7,394	7,855	3,227			
38	52	175	68	194	7,327	7,781	3,278			
39	52	175	68	194	7,251	7,694	3,325			
40	52	175	68	194	7,203	7,637	3,384			
41	52	175	68	194	7,14	7,564	3,434			
42	52	175	68	194	7,081	7,497	3,483			
43	52	175	68	194	7,019	7,424	3,531			
44	52	175	68	194	6,989	7,385	3,594			
45	52	175	68	194	6,94	7,329	3,643			
46	52	175	68	194	6,899	7,278	3,699			
47	52	175	68	194	6,872	7,241	3,76			
48	52	175	68	194	6,823	7,184	3,804			
49	52	175	68	194	6,794	7,144	3,863			
50	52	175	68	194	6,776	7,117	3,926			
51	52	175	68	194	6,737	7,069	3,975			
52	52	175	68	194	6,715	7,036	4,035			
53	52	175	68	194	6,703	7,013	4,1			
54	52	175	68	194	6,661	6,962	4,144			



Numero	X valle m	Y valle m	X monte m	Y monte m	Fellenius	Bishop	Janbu	G.L.E.	Sarma	Spencer
55	52	175	68	194	6,664	6,954	4,218			
56	52	175	68	194	6,637	6,915	4,272			
57	52	175	68	194	6,627	6,896	4,334			
58	52	175	68	194	6,614	6,872	4,396			
59	52	175	68	194	6,618	6,862	4,47			
60	52	175	68	194	6,592	6,826	4,519			
61	52	175	68	194	6,6	6,822	4,595			
62	52	175	68	194	6,582	6,794	4,649			
63	52	175	68	194	6,582	6,779	4,72			
64	52	175	68	194	6,598	6,782	4,8			
65	52	175	68	194	6,591	6,764	4,861			
66	52	175	68	194	6,584	6,742	4,927			
67	52	175	68	194	6,595	6,742	5,001			
68	52	175	68	194	6,598	6,73	5,073			
69	52	175	68	194	6,594	6,712	5,136			
70	52	175	68	194	6,618	6,722	5,224			
71	52	175	68	194	6,604	6,694	5,278			
72	52	175	68	194	6,636	6,71	5,375			
73	52	175	68	194	6,622	6,682	5,43			
74	52	175	68	194	6,649	6,691	5,524			
75	52	175	68	194	6,655	6,683	5,595			
76	52	175	68	194	6,683	6,692	5,691			
77	52	175	68	194	6,688	6,682	5,761			
78	52	175	68	194	6,709	6,684	5,853			
79	52	175	68	194	6,718	6,677	5,929			
80	52	175	68	194	6,743	6,682	6,024			
81	52	175	68	194	6,761	6,684	6,108			
82	52	175	68	194	6,79	6,692	6,212			
83	52	175	68	194	6,79	6,674	6,28			
84	52	175	68	194	6,853	6,715	6,417			
85	52	175	68	194	6,855	6,699	6,488			
86	52	175	68	194	6,88	6,7	6,59			
87	52	175	68	194	6,897	6,697	6,681			
88	52	175	68	194	6,94	6,717	6,805			
89	52	175	68	194	6,954	6,711	6,89			
90	52	175	68	194	6,974	6,71	6,987			
91	52	175	68	194	7,01	6,721	7,11			
92	52	175	68	194	7,039	6,73	7,214			
93	52	175	68	194	7,073	6,74	7,33			
94	52	175	68	194	7,091	6,737	7,426			
95	52	175	68	194	7,11	6,737	7,516			
96	52	175	68	194	7,112	6,737	7,534			
97	52	175	68	194	7,089	6,722	7,5			
98	52	175	68	194	7,075	6,716	7,478			
99	52	175	68	194	7,085	6,726	7,495			
100	52	175	68	194	7,058	6,706	7,456			

Accelerazione sismica orizzontale (g):..... 0,05

Coefficiente beta.....: 0,2

Accelerazione sismica verticale (g):..... 0,025

Normativa di riferimento: D.M.14.01.2008 (Apr.I Comb.2)



Committente: Cava Tirso snc

Località: Busachi

Data: Marzo 2023

Riferimenti:

Analisi di stabilità: riepilogo delle superficie con coefficiente di sicurezza minimo

Superf.	Fs minimo	Metodo di calcolo	Concio	X base m	Y base m	Lunghezza m	Inclinazione °	Volume mc	Peso kg	Altezza falda m	Carichi N	Carichi T	Phi (°)	C(kg/cmq)	Parametri	Fs parziale
12	1,939	Janbu semplificato		52	175											
			1	53,6	174,169	1,8	-27,5	6,532	14079,98	0	0	0	60,6	4,487	ammasso	32,76
			2	55,2	173,603	1,7	-19,5	15,649	33791,95	0	0	0	58,4	4,6406	ammasso	17,794
			3	56,8	173,267	1,63	-11,9	18,503	40127,92	0	0	0	57,7	4,7143	ammasso	21,799
			4	58,4	173,143	1,6	-4,5	18,872	41183,91	0	0	0	57,5	4,7329	ammasso	53,817
			5	60	173,222	1,6	2,9	28,908	63360,1	0	0	0	55,7	4,9813	ammasso	43,911
			6	61,6	173,511	1,63	10,2	38,613	84480,05	0	0	0	54,4	5,2195	ammasso	11,445
			7	63,2	174,024	1,68	17,8	37,748	82368,09	0	0	0	54,7	5,1622	ammasso	6,528
			8	64,8	174,793	1,78	25,7	35,987	78495,98	0	0	0	55,2	5,0697	ammasso	4,571
			9	66,4	175,877	1,93	34,1	32,528	71103,93	0	0	0	56	4,9299	ammasso	3,621
			10	68	177,4	2,21	43,6	28,378	62303,94	0	0	0	57,1	4,7762	ammasso	3,121

LEGENDA

Carichi N= Carichi normali (kg)

Carichi T= Carichi tangenziali (kg)

Phi= Angolo di resistenza al taglio (°)

C= Coesione (kg/cmq)

N.B.: dove il fattore di sicurezza parziale è <1 viene usata la resistenza al taglio residua.

Accelerazione sismica orizzontale (g):..... 0,05

Accelerazione sismica verticale (g):..... 0,025

Coefficiente beta.....: 0,2

Normativa di riferimento: D.M.14.01.2008 (Appr.I Comb.2)