

COMUNE DI CARRARA

PROVINCIA DI MASSA CARRARA

PROGETTO VARIANTE NON SOSTANZIALE DELLA CAVA DENOMINATA "TORRIONE" N.55



Riferimento legge ex art. 23 comma 2 della legge regionale 35/2015

ESERCENTE:

Societa' Apuana Marmi s.r.l.

TITOLO:

**RELAZIONE STABILITA' RAVANETI
(ART.32 PABE)**

II TECNICO:

Dott. Ing. Massimo Gardenato
ingegnere minerario



TAV:

DATA:

OTTOBRE 2021

FILE:

RelStabRa_SCIA21.odt



via G.Pascoli, 44 55032 Castelnuovo Garf.na (LU) - via di Turigliano, 24a 54033 Carrara (MS)
Tel. 0585 093077 e e-mail: studio@rocnet.net



RELAZIONE STABILITA' RAVANETI (ART.32 NTA PABE)

Premessa

La presente relazione tecnica è stata redatta dallo scrivente su incarico della società Società Apuana Marmi s.r.l. a corredo della Segnalazione Certificata di inizio attività per la cava "Torrione" n°55 ai sensi dell' Art.23 comma 2 della L.R. 35/15.

I lavori di progetto si rendono necessari al fine di mettere in sicurezza il ravaneto classificato nella cartografia del PABE come ravaneto a “Pericolosità geomorfologica elevata e molto elevata”, come suggerito ed imposto dal comma 1 dell'Art.32 delle Norme di Attuazione del PABE.

I lavori di messa in sicurezza riguarderanno l'asportazione del detrito con la scopertura, ove possibile e dove stimato da analisi di documentazione fotografica e cartografica e dai risultati dell'indagine geofisica, del substrato roccioso in particolare in corrispondenza della ex cava Torrione sino al gradone di quota 675 m ca. I lavori prevedono, in questa fase, unicamente la messa in sicurezza di una porzione del ravaneto che, come specificato nel seguito, si sviluppa da quota 776 a quota 650. Per la restante porzione che si sviluppa da quota 650 m ca. a quota 766 m ca. nell'area a confine con altre cave si provvederà alla redazione di successivo specifico progetto, da redarsi con le società confinanti entro i termini previsti dall'art. 32.

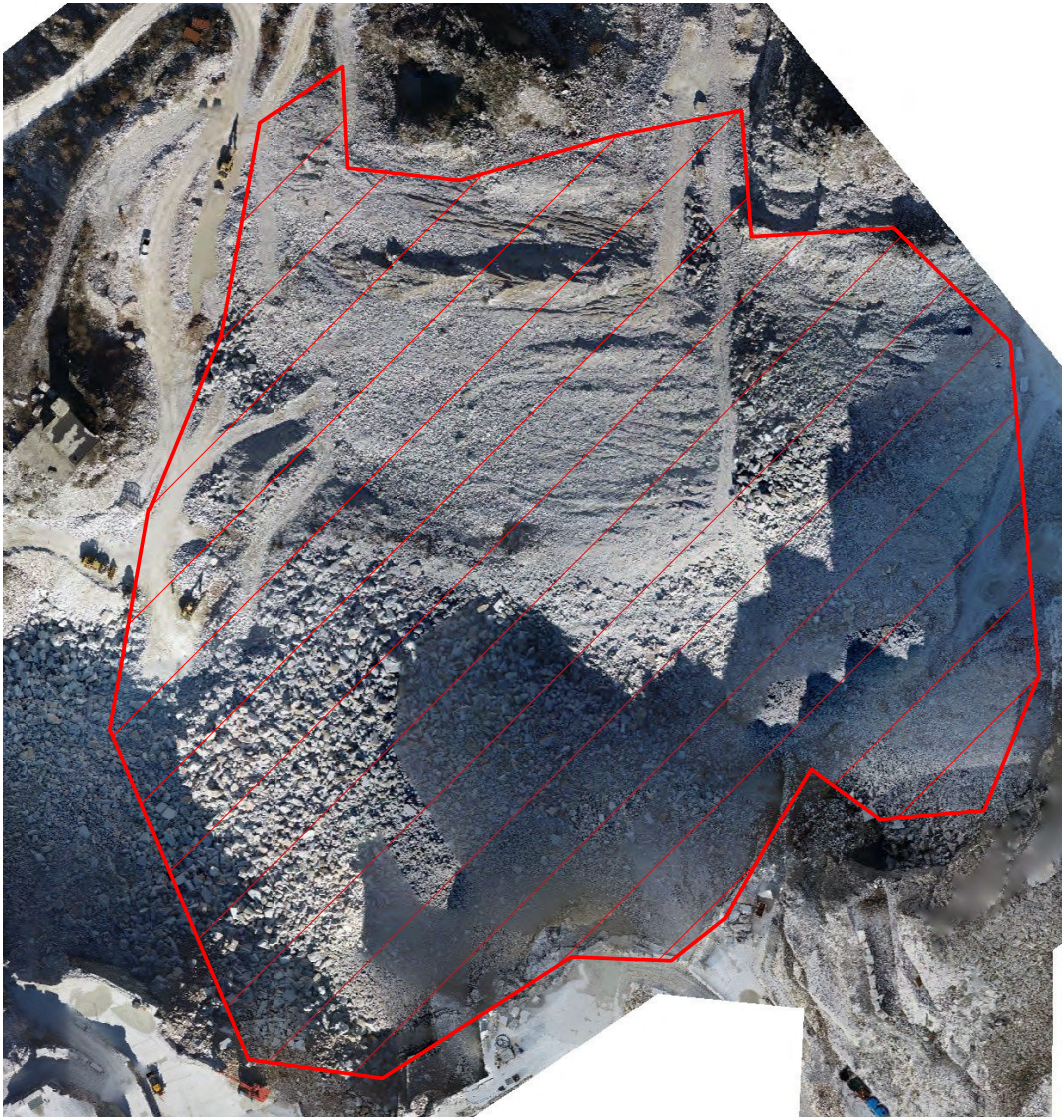
Quindi, ai sensi dell'art. 32 delle Norme Attuative del PABE si procederà a condurre una specifica valutazione di stabilità del ravaneto.

L'asportazione del detrito non può che migliorare la stabilità alla grande scala del versante detritico, diminuendo il peso alla “testa” dello stesso e scoprendo, dove possibile, il substrato roccioso e le bancate sepolte della ex Cava Torrione, diminuendo le forze instabilizzanti che agiscono sul deposito.



Individuazione Ravaneti (Stato attuale)

La cava è raggiungibile dalla strada comprensoriale del Bacino di Torano ed il ravaneto oggetto di studio si trova al di sotto della cava adiacente Tecchione n.52, estendendosi per ca. 180 m per un dislivello compreso tra i 120 e i 130 m. Le lavorazioni autorizzate prevedono già la rimodellazione del ravaneto con contestuale realizzazione della strada di accesso alla porzione superiore della cava altrimenti non raggiungibile. Tali lavorazioni sono autorizzate con Det. N.10 del 07/02/2018 dal Comune di Carrara e n° 44 del 09.05.2017, per la prima fase a 12 anni e valevole fino al 09/05/2029. Si riporta in seguito un' ortofoto del ravaneto oggetto di studio della cava Torrione N.55.



Ravaneto Cava Torrione N.55 classificato a pericolosità geologica elevata e molto elevata e oggetto di studio

COMMITTENTE: Società Apuana Marmi s.r.l.
OGGETTO: Relazione stabilità ravaneti (Art.32-PABE) – Segnalazione certificata inizio attività cava Torrione n° 55
DATA: Ottobre 2021



Il ravaneto a pericolosità geomorfologica elevata si estende anche in direzione N e anche in altre proprietà. Il presente progetto prevede la sistemazione definitiva solo della porzione evidenziata in foto precedente, mentre si rimanda, entro i termini di 24 mesi definiti dall'art. 32, a progetto successivo la messa in sicurezza della porzione rimanente.

Interventi di progetto

Come già detto in premessa, le lavorazioni di progetto riguarderanno l'asportazione del detrito e la scopertura del substrato roccioso in corrispondenza dell'ex cava Torrione, al fine di diminuire il peso del versante detritico alla testa e diminuire quindi le forze instabilizzanti che agiscono su di esso.

Per la verifica di stabilità è stata utilizzata la sezione 2-2 in quanto rappresenta il profilo più critico del versante detritico.

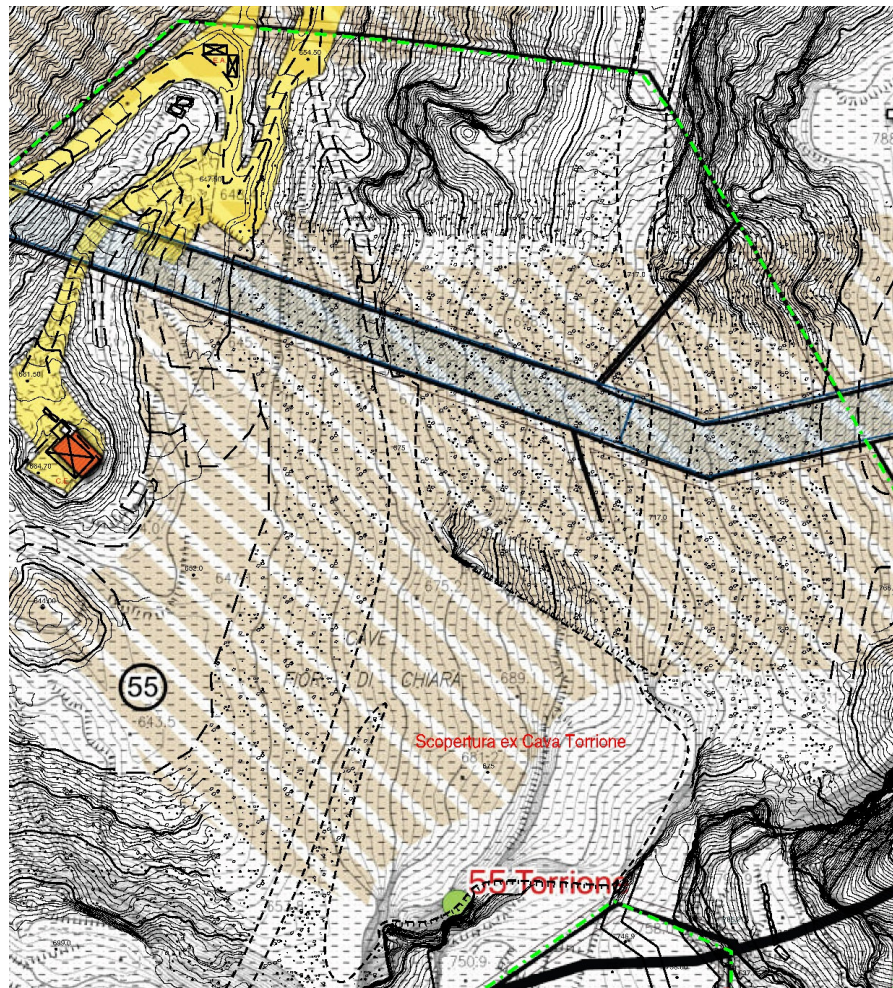
La messa in sicurezza e riprofilatura del ravaneto consentirà, al termine dei lavori di cui alla presente SCIA, di richiedere la modifica dell'area a pericolosità geomorfologica nelle aree descritte sopra, mentre le rimanenti aree dovranno essere oggetto di successiva analisi di stabilità ai sensi dell'art. 32.



Analisi di stabilità scarpata su ravaneto

In questo capitolo si discuterà sulla stabilità del versante detritico all'interno della cava denominata Torrione n.55 che come si vede nell'estratto cartografico di seguito ricade all'interno dei ravaneti classificati come a pericolosità geologica elevata e molto elevata. La sezione utilizzata per la stabilità è la sezione 2-2 che risulta essere la più critica e peggiorativa nel contesto oggetto di studio (per il profilo di dettaglio del progetto e dell'andamento stimato del substrato roccioso si rimanda alla tavola allegata sulle sezioni).

La gestione e asportazione del detrito avviene già con le lavorazioni attuali, come da progetto autorizzato, ed in questa fase si vorrà asportare il detrito e scoprire il substrato roccioso e le bancate sepolte della ex cava Torrione (dove raggiungibile) ai fini della messa in sicurezza del versante.



Estratto planimetrico della tavola di progetto con sovrapposizione la tavola descrittiva del PABE

| | |
|---------------------|---|
| COMMITTENTE: | Società Apuana Marmi s.r.l. |
| OGGETTO: | Relazione stabilità ravaneti (Art.32-PABE) – Segnalazione certificata inizio attività cava Torrione n° 55 |
| DATA: | Ottobre 2021 |



Caratterizzazione dei parametri geotecnici del deposito

Il materiale costituente il deposito detritico è quanto mai vario in termini di granulometria in quanto la sua formazione è costituita da accumuli di materiale di scarto proveniente dall'attività estrattiva.

La granulometria è variabile: in prevalenza, gli accumuli sono costituiti da clasti da decimetrici a metrici, mentre la frazione fine è subordinata, dipendente dall'età del ravaneto e quindi dalla metodologia utilizzata per l'estrazione dei blocchi di marmo. Massi e blocchi tendono ad accumularsi generalmente al piede, mentre i clasti più piccoli si attestano nelle porzioni medio-alte dell'accumulo. L'evoluzione dei metodi d'escavazione, ha anche portato nei secoli a variazioni granulometriche dei ravaneti, dove si riconoscono porzioni formate da blocchi metrici, pezzame (decimetrico o pluridecimetrico) e detrito più fine (da centimetrico a minore di 1 cm). In alcune aree, una pezzatura può prevalere (in genere, nei ravaneti più vecchi), mentre in altre si ha un maggiore assortimento granulometrico. Osservazioni lungo sezioni stratigrafiche in vari ravaneti evidenziano il succedersi di livelli detritici differenziati per granulometria e struttura, determinati dall'evoluzione delle tecniche estrattive nel tempo. Dalla fine anni degli anni 80 ad oggi l'utilizzo del filo diamantato e delle seghe a catena, ha comportato un aumento della matrice fine negli accumuli.

Al fine di compiere l'analisi di stabilità è pertanto essenziale determinare un valore dell'angolo di attrito interno da avere come riferimento nelle scelte progettuali.

Sulla base della nomenclatura proposta da Baroni *et al.* gli elementi granulometrici dei ravaneti sono i seguenti:

- *informi*: blocchi con dimensioni minime superiori ai 50 cm, non utilizzabili a scopi commerciali per la forma irregolare;
- *pezzame*: clasti con dimensioni variabili dai 30 ai 50cm;
- *sassi*: clasti di dimensione variabile tra i 10 e 30cm;
- *fine*: clasti di dimensione inferiori ai 10 cm;
- *terre*: elementi con dimensioni dalle argille alle ghiaie.

La relativa percentuale è d'incerta definizione ed in ogni caso la distribuzione può correlarsi al periodo di costruzione del ravaneto. Si riconosce comunque che il ravaneto è un assemblaggio di particelle e clasti di varia pezzatura fino ai blocchi metrici che manifesta un comportamento variabile riconducibile tuttavia a quello di un *rockfill*, cioè di un ammasso di materiale incoerente di granulometria controllata, utilizzato per la costruzione dei paramenti



delle dighe in terra, tranne evidentemente nelle zone dove le terre (vale a dire il materiale francamente granulare) prevalgono costituendo stratificazione d'importante spessore. Queste particolari situazioni locali sono escluse dall'analisi di questo rapporto.

Come riportato ampiamente nella letteratura scientifica i *rockfill* hanno risposta meccanica paragonabile a quella di un giunto in roccia.

Barton introdusse la seguente relazione empirica per la resistenza a taglio di giunti di roccia:

$$\tau_{n,f} = \sigma_{n,f} \tan \left[JRC \log \left(\frac{JCS}{\sigma_{n,f}} \right) + \varphi_b \right]$$

dove $\tau_{n,f}$ è la resistenza d'attrito di picco, $\sigma_{n,f}$ la tensione normale agente sul piano di rottura efficace, *JRC* il *Joint Roughness Coefficient*, *JCS* il *Joint wall Compressive Strength*, φ_b angolo d'attrito di base o residuo.

Il modello per la stima della resistenza al taglio proposto per un *rockfill* è concettualmente identico al modello applicato ai giunti di roccia (modello di Barton e Kjaensrli, BK). I parametri che specializzano il *rockfill* nel modello sono la rugosità equivalente *R* (*effective roughness*), che sostituisce *JRC*, e la resistenza alla frantumazione dei clasti *S*, che sostituisce *JCS*. Questi sono funzione della porosità dell'accumulo e del grado di compattazione, della dimensione dei clasti, nonché della tipologia di prova (taglio piano, triassiale). In formula:

$$\tau_{n,f} = \sigma_{n,f} \tan \left[R \log \left(\frac{S}{\sigma_{n,f}} \right) + \varphi_b \right]$$

Il modello BK ha il pregio di considerare la dilatanza che un sistema compatto di blocchi sufficientemente incastrati manifesta sotto sforzo di taglio in assenza di vincoli alla variazione volumetrica in condizioni drenate. La dilatanza si traduce in un angolo d'attrito apparente più pronunciato ai livelli tensionali bassi, corrispondenti agli strati più superficiali degli accumuli. All'aumento dello stato tensionale la graduale soppressione a seguito di disgregazione degli spigoli dei clasti e delle asperità (come nei giunti) porta ad una riduzione dell'angolo d'attrito fino al valore tendenziale corrispondente a quello della polvere di marmo o a quello che si manifesta tra superfici lisce di blocchi dello stesso materiale.

Al fine di definire i parametri del criterio di rottura nel 2013 è stato realizzato uno studio presso le cave all'interno del bacino estrattivo di Carrara in cui sono state eseguite una serie di



prove di *tilting* e di taglio con carico variabile in sito utilizzando cassoni in lamiera di ferro di 1.5 x 3.0 x 0.5 m³ sovrapposti e riempiti con materiale riveniente dai ravaneti di vari mucchi differenti prelevati sia nella cava in oggetto che in quelle limitrofe sulla scorta dello studio originale di Barton.



Apparecchiatura utilizzata per le prove di taglio e di tilt test

Le prove effettuate riferiscono a livelli tensionali bassi e per un materiale non addensato, in accordo alla mancanza di costipamento dei clasti nello strato superficiale dei ravaneti ed alla potenzialità dei macchinari di movimentazione carico resi disponibili nei siti di cava.

La rispondenza del campione, in considerazione della sua dimensione, al comportamento del materiale negli strati superficiali del ravaneto può tuttavia considerarsi piena. Poiché i valori della tensione normale operante sul piano di rottura (sia nei tilt test che nelle prove di taglio diretto) sono modesti, i risultati si collocano (come descritto in seguito) nella parte iniziale del criterio di rottura, con tendenza sensibilmente lineare. Di conseguenza per l'interpolazione dei dati si è utilizzata una relazione di regressione lineare. Ne consegue che per tutti i mucchi per lo stato tensionale saggiato, corrispondente grossomodo a meno di 5 metri di copertura, si è introdotto in definitiva un criterio di resistenza a taglio alla Mohr-Coulomb (MC):

$$\tau_{n,f} = \sigma_{n,f} \tan \varphi + c$$



caratterizzato dai due parametri φ angolo d'attrito e c coesione. Si rimarca che i valori di coesione sono pressoché trascurabili, in accordo alla natura tipicamente incoerente dei materiali di ravaneto costituenti i mucchi saggiati.

Alla luce dei risultati conseguiti con suddette prove si può affermare che i mucchi esibiscono resistenza variabile con la profondità, riconoscendosi per la parte più superficiale un angolo d'attrito sui 50° dovuto all'effetto di interlocking con dilatanza non confinata, mentre per gli strati inferiori ai fini dell'effettuazione di analisi di stabilità si può attribuire al materiale una resistenza di 45° di angolo d'attrito φ ed una debole coesione c di 0.3 t/mq se si opera considerando la resistenza di picco $\varphi = \varphi_p$.

Ovviamente nell'analisi svolta di seguito viene completamente trascurata la coesione e verrà utilizzato come valore di angolo di attrito caratteristico $\varphi = 45^\circ$ per il deposito.

Verifica pendio

Il metodo di calcolo adoperato nella valutazione della stabilità è il metodo di Bishop, basato sul concetto dell'equilibrio limite globale, con superficie di scivolamento assimilabile ad un arco di circonferenza dove il livello di sicurezza può essere espresso in termini di momenti rispetto al centro della circonferenza stessa:

$$\frac{\frac{1}{\gamma_R} * M_S}{\gamma_{G1} * M_R}$$

in cui M_R è il momento delle forze ribaltanti, M_S il momento stabilizzante calcolato utilizzando i valori caratteristici dei parametri geotecnici del terreno divisi i loro coefficienti parziali γ_M , mentre γ_R e γ_{G1} i rispettivi coefficienti parziali per le azioni e per le resistenze sopra accennati.

Tale metodo ha il vantaggio della semplicità in quanto, rispetto a metodi più complessi e completi quali quello di Morgenstern-Price, differisce nei risultati di poche unità percentuali.

Per la ricerca della superficie occorre, prima di tutto, considerare una serie di cerchi di scorrimento aventi il medesimo centro di rotazione, ma di raggio diverso. Se si trova il fattore di sicurezza di ciascuno di questi cerchi, uno dopo l'altro, e si traccia un grafico rispetto al raggio, è probabile che a un certo punto si trovi un "fattore di sicurezza minimo".



Ciò si può ottenere semplicemente dalla forma del pendio oppure perché quel particolare cerchio di scorrimento ha intercettato un terreno debole. Se un insieme analogo di cerchi di scorrimento viene esaminato da ciascuno di una intera serie di cerchi (una griglia rettangolare è molto adatta) si può, allora, ottenere un fattore di sicurezza minimo per ogni punto: quello col fattore più basso darà il fattore di sicurezza per l'intero pendio. Il contributo dovuto alla presenza di un battente idraulico è a parere dello scrivente di minima entità. Questa affermazione si basa su vari aspetti legati sia al tipo di materiale di cui è costituito il deposito, sia dal fatto che le opere di regimazione poste al di sopra di esso, tendono ad allontanare le acque piovane che gravano in questa zona non permettendo un notevole accumulo di acqua all'interno del deposito stesso, inoltre la pendenza del substrato roccioso impedisce qualunque ristagno o formazione di battenti.

Infatti, come già detto in precedenza, la granulometria del deposito è molto variabile il che porta a considerare questo materiale nella sua quasi totalità, ma soprattutto alle profondità dove ipoteticamente si realizza la superficie di rottura, come discretamente permeabile.

Comunque per porsi in ogni caso nella condizione peggiore, come d'altronde suggerisce il D.M. LL.PP. del 14/01/2008, si è deciso in ogni modo di considerare il contributo legato alla presenza di acqua andando a valutare la stabilità del versante impostando altresì il materiale saturo con peso specifico ($\gamma_s=2.2t/m^3$). Il battente d'acqua considerato è altamente improbabile e quindi cautelativo, in quanto non è possibile nella fattispecie la presenza di un flusso idrico lungo il substrato roccioso come considerato nelle analisi di stabilità.

Nel seguito si riporteranno le immagini delle analisi eseguite per la sezione di stabilità descritta in precedenza, andando a considerare la presenza sia del sisma che dell'acqua, sia del carico dei possibili mezzi che transitano lungo le strade intermedie del ravaneto, introducendo i parametri di resistenza del materiale detritico descritti nel paragrafo dedicato.

Va sottolineato come il profilo del substrato roccioso risulta essere una stima basandosi sui vari rilievi 3D eseguiti con Laser Scanner ad alta precisione, ma soprattutto, da un'analisi eseguita osservando delle foto passate del sito oggetto di studio.

Ai valori del Fattore di Sicurezza riportati nelle immagini successive bisogna applicare il coefficiente parziale γ_R per cui l'effettivo livello di sicurezza valutato secondo il D.M.



14/01/2008 è pari al suddetto valore diviso per 1.1 in condizioni statiche ed 1.2 in condizioni pseudostatiche.

Come si noterà dalle immagini successive il valore del fattore di sicurezza richiesto da normativa è soddisfatto sia nelle condizioni statiche che nelle condizioni pseudo-statiche. I fattori di sicurezza dimostrano che l'intervento va verso un miglioramento della stabilità globale del pendio, rimuovendo peso di materiale alla testa e scoprendo dove possibile il substrato roccioso, andando a ridurre la forza instabilizzante sul versante.

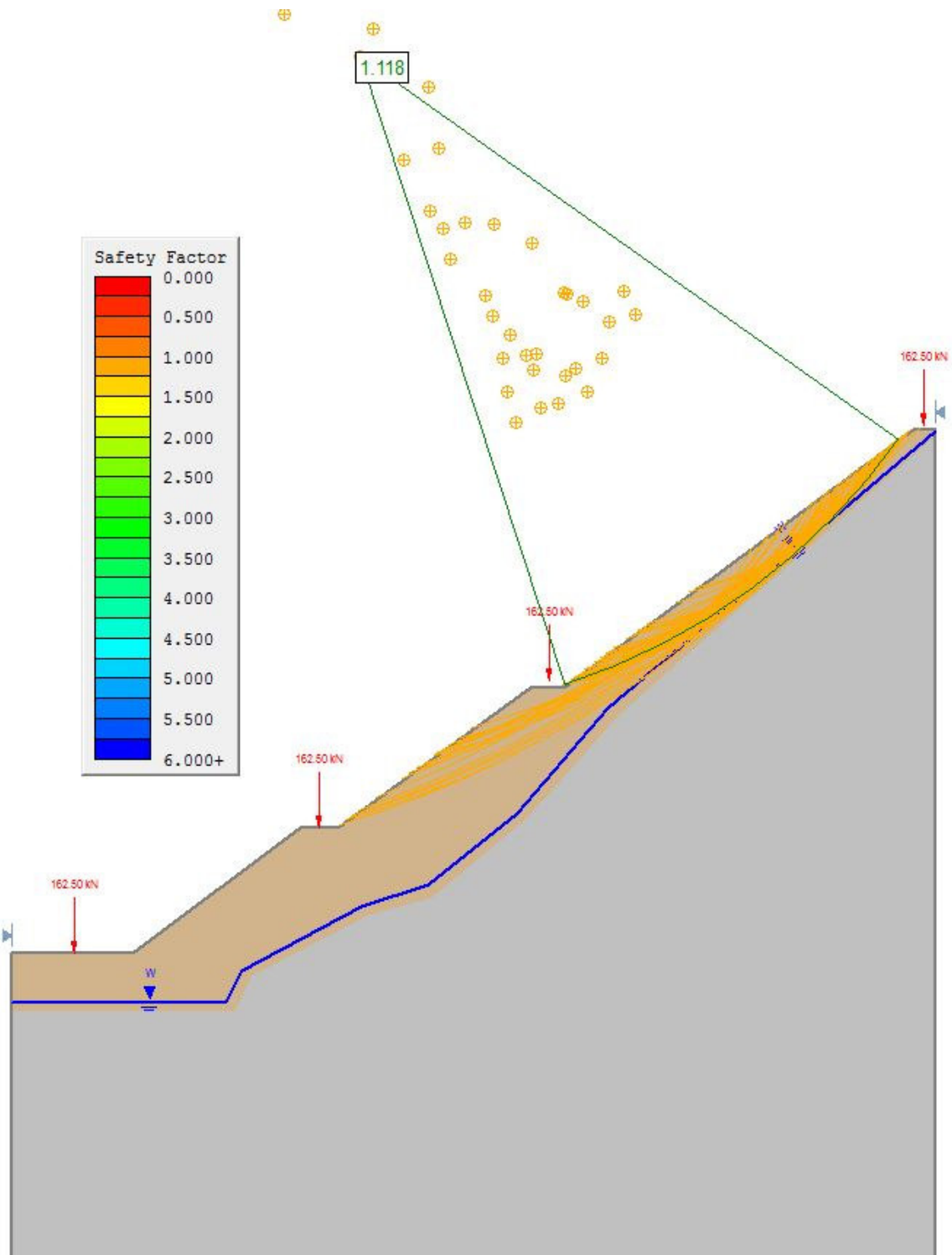
Coefficienti sismici orizzontale e verticale rispettivamente risultano essere $k_h=0,0743$ e $k_v=0,0371$ (vedasi Appendice).

Di seguito si riportano le immagini delle analisi di stabilità eseguite con il software Slide sul ravaneto che si estende all'interno della cava denominata Torrione n.55, semplificando la stratigrafia del ravaneto e del substrato roccioso. Come già detto precedentemente le analisi sono state condotte sia per lo stato attuale, che per lo stato di progetto e in condizione statiche (FS di sicurezza minimo 1.1 imposto da normativa – vedi Allegato I) e pseudostatiche (FS di sicurezza minimo 1.2 imposto da normativa – vedi Allegato I). Oltre al carico del materiale è stato considerato il carico concentrato dovuto ai mezzi di trasporto (camion) prendendo cautelativamente il contemporaneo passaggio dei camion nei punti di strada attraversati dalla sezione.

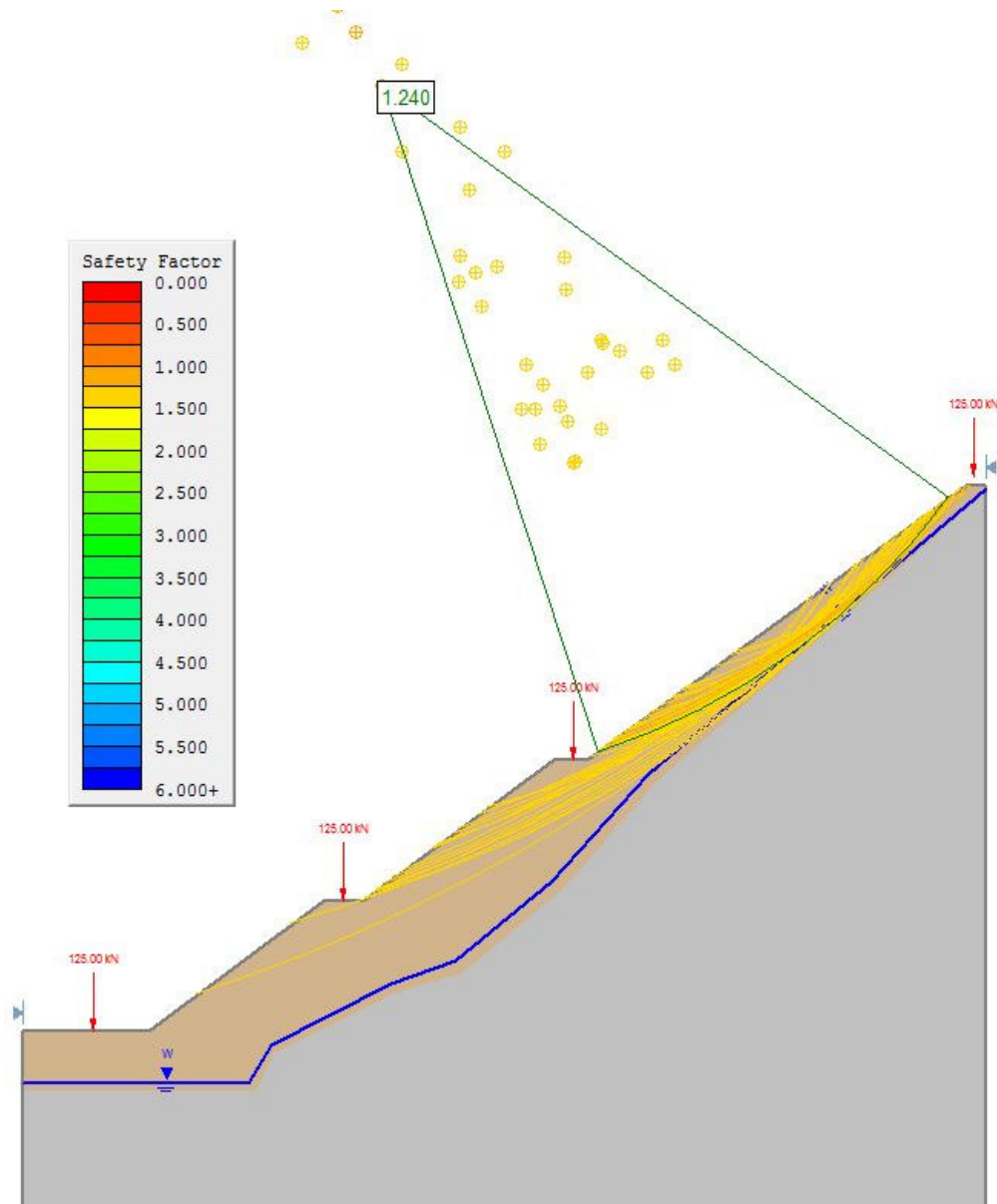
Come si vedrà nelle immagini di seguito è stato utilizzato cautelativo un battente idraulico a e quindi altamente improbabile nella realtà, considerando che si tratti di un materiale consolidato ma pur sempre poroso.

Infine, si evidenzia come lo studio debba essere condotto su una ampia sezione del ravaneto e che quindi ricercando una linea di scivolamento che possa interessare una porzione di ravaneto che sia la più grande possibile. Per questo la ricerca della linea di scivolamento è stata impostata partendo da una profondità minima di 5 m.

Nelle immagini di sotto sono presenti le 50 linee di scivolamento più critiche ed in verde è evidenziata la linea di scivolamento con fattore di sicurezza più critico per il profilo di versante considerato.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione in condizioni statiche – stato progetto.



Analisi delle possibili linee di scivolamento per la sezione in condizioni pseudostatiche – stato progetto.

Conclusioni

La sezione di stabilità considerata, ampiamente cautelativa, soddisfa il fattore di sicurezza minimo richiesto da normativa (NTC 2018) sia nelle condizioni statiche sia nelle condizioni pseudo-statiche.

Non saranno necessarie opere di tenuta come bastioni o muri di sostegno in quanto la pendenza del versante sarà impostata tenendo conto dell'angolo critico del materiale



(pendenza massima ca. 38°).

In linea generale le modifiche, se pur limitate, di progetto porteranno ad un miglioramento della stabilità globale del ravaneto in quanto verrà rimosso e asportato del materiale alla testa e conseguentemente verrà diminuito del peso che rappresenta il fattore maggiormente instabilizzante del pendio. Inoltre, dove si ipotizza ci sia un affioramento del substrato roccioso (al di sotto della cava ex Torrione fino alla quota di 675 m ca.) il materiale detritico verrà completamente rimosso.

Questo viene confermato dalle analisi sopra riportate: in condizione pseudostatiche il fattore di sicurezza è superiore rispetto alle condizioni statiche quindi i parametri geotecnici e geometrici del terreno contribuiscono ad avere, nel caso del materiale considerato, un'influenza maggiore sull'instabilità rispetto al sisma (in condizioni pseudostatiche l'angolo di attrito considerato per il materiale è quello reale, ovvero 45°, mentre in condizioni statiche l'angolo di attrito è quello ridotto dai coefficienti parziali suggeriti dalla normativa NTC2018-vedi Allegato I).

Come già specificato sia all'interno della relazione tecnica sia all'interno della presente relazione di stabilità, il profilo del substrato roccioso tracciato risulta una stima sulla base dell'indagine geofisica ma soprattutto della documentazione cartografica e fotografica analizzata. Questo in quanto i limiti tecnologici e strumentali delle stese sismiche non hanno permesso, soprattutto per le stese sismiche Torrione 2 e 3, l'individuazione corretta del substrato roccioso.

In conclusioni, le lavorazioni di progetto per la messa in sicurezza ai sensi del comma 1 dell'Art.32 delle Norme di Attuazione del PABE risultano essere idonee a garantire un soddisfacente livello di sicurezza per quanto riguarda la stabilità del ravaneto.

Carrara, Ottobre 2021

Il Tecnico
Dott. Ing. Massimo Gardenato



Allegato I

Normativa Tecnica
Progettazione Geotecnica e Progettazione Sismica



Normativa - Generalità

Per la verifica della sicurezza dell'opera da realizzarsi ci si rifà a quanto riportato nel Decreto del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti del 17/01/2018 e successiva circolare del 29/0/2019 di cui di seguito si dà una breve e sintetica descrizione. Le indicazioni nelle suddette norme stabiliscono che la sicurezza e le prestazioni di un'opera devono essere valutate in relazione agli stati limite che si possono verificare durante la loro vita nominale. In particolare le opere e le tipologie di intervento devono possedere il requisito di:

- *sicurezza nei confronti di stati limite ultimi (SLU)*, vale a dire: capacità di evitare crolli, perdite di equilibrio e dissesti gravi, totali o parziali, che possano compromettere l'incolumità delle persone ovvero comportare la perdita di beni, ovvero provocare gravi danni ambientali e sociali, ovvero mettere fuori servizio l'opera;
- *sicurezza nei confronti di stati limite di esercizio (SLE)*, vale a dire: capacità di garantire le prestazioni previste per le condizioni di esercizio.

Per le verifiche di sicurezza relative agli stati limite ultimi (SLU) deve essere rispettata la condizione $E_d < R_d$ dove:

R_d è la resistenza di progetto, valutata in base ai valori di progetto della resistenza dei materiali e ai valori nominali delle grandezze geometriche interessate;

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot R \left[\gamma_F F_K; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

E_d è il valore di progetto dell'effetto delle azioni, valutato in base ai valori di progetto

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left[F_K; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

delle azioni.

La verifica della suddetta condizione deve essere effettuata impiegando diversi coefficienti parziali, definiti sia per le azioni, sia per i parametri geotecnici e sia per le resistenze.



Progettazione geotecnica

Le verifiche agli stati limite devono essere eseguite per tutte le più gravose condizioni di carico che possono agire sulla struttura. Nelle verifiche agli stati limite ultimi si distinguono:

- lo stato limite di equilibrio come corpo rigido: EQU
- lo stato limite di resistenza della struttura compresi gli elementi di fondazione: STR
- lo stato limite di resistenza del terreno: GEO

Per effettuare la verifica è necessario fare la distinzione fra i parametri caratteristici ed i valori di calcolo (o di progetto) sia delle azioni che delle resistenze in quanto i valori di calcolo si ottengono dai valori caratteristici mediante l'applicazione di opportuni coefficienti di sicurezza parziali γ . Per le verifiche nei confronti dello stato limite ultimo di equilibrio come corpo rigido (EQU) si utilizzano i coefficienti γ_f riportati nella colonna EQU della Tabella successiva, mentre per la progettazione di componenti strutturali che non coinvolgano azioni di tipo geotecnico, le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) si eseguono adottando i coefficienti γ_f riportati nella colonna A1 della medesima Tabella. Per la progettazione di elementi strutturali che coinvolgano azioni di tipo geotecnico (plinti, platee, pali, muri di sostegno, ...) le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi strutturali (STR) e geotecnici (GEO) si eseguono adottando due possibili approcci progettuali, fra loro alternativi. Nell'Approccio 1 sono previste due diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni γ_f , per la resistenza dei materiali γ_m e, eventualmente, per la resistenza globale del sistema γ_R : la prima combinazione è generalmente la più severa nei confronti del dimensionamento strutturale delle opere a contatto con il terreno (coefficienti A1 della tabella successiva), mentre la seconda combinazione è generalmente più severa nei riguardi del dimensionamento geotecnico (coefficienti A1 della tabella successiva). Nell'Approccio 2 si impiega un'unica combinazione dei gruppi di coefficienti parziali definiti per le azioni γ_f , per la resistenza dei materiali γ_m e, eventualmente, per la resistenza globale γ_R . In tale approccio, per le azioni si impiegano i coefficienti γ_m riportati nella colonna A1, da adottare sia nelle verifiche strutturali sia nelle verifiche geotecniche.



Coefficienti di partecipazione combinazioni statiche

Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni:

| <i>Carichi</i> | <i>Effetto</i> | γ_f o γ_e | <i>EQU</i> | <i>A1</i> | <i>A2</i> |
|----------------|----------------|-------------------------|------------|-----------|-----------|
| Permanenti | Favorevole | γ_{Gfav} | 0,90 | 1,00 | 1,00 |
| Permanenti | Sfavorevole | γ_{Gsfav} | 1,10 | 1,30 | 1,00 |
| Variabili | Favorevole | γ_{Qfav} | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| Variabili | Sfavorevole | γ_{Qsfav} | 1,50 | 1,50 | 1,30 |

In accordo a quanto stabilito in precedenza la verifica della condizione $E_d < R_d$ deve essere effettuata impiegando diverse combinazioni di gruppi di coefficienti parziali, rispettivamente definiti per le azioni (A1, A2), per i parametri geotecnici (M1, M2) e per le resistenze (R1, R2 e R3).

Per il valore di progetto della resistenza R_d la Norma afferma che può essere determinato:

1. in modo analitico, con riferimento al valore caratteristico dei parametri geotecnici del terreno, diviso per il valore del coefficiente parziale γ_M e tenendo conto, ove necessario, dei coefficienti parziali γ_R relativi a ciascun tipo di opera;
2. in modo analitico, con riferimento a correlazioni con i risultati di prove in sito, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R relativi a ciascun tipo di opera;
3. sulla base di misure dirette su prototipi, tenendo conto dei coefficienti parziali γ_R relativi a ciascun tipo di opera;

dove i coefficienti da utilizzare nelle verifiche nei confronti degli stati limite ultimi sono:

Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno:

| <i>Parametri</i> | γ_m | <i>M1</i> | <i>M2</i> |
|---------------------------------|----------------------|-----------|-----------|
| Tangente dell'angolo di attrito | $\gamma_{\tan\phi'}$ | 1,00 | 1,25 |
| Coesione efficace | $\gamma_{c'}$ | 1,00 | 1,25 |
| Resistenza non drenata | γ_{cu} | 1,00 | 1,40 |
| Peso dell'unità di volume | γ_γ | 1,00 | 1,00 |

Nel seguito si elenca la simbologia adottata nelle tabelle precedenti e la grandezza a cui si riferisce:

Simbologia adottata

| | |
|----------------------|---|
| γ_{Gsfav} | Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni permanenti |
| γ_{Gfav} | Coefficiente parziale favorevole sulle azioni permanenti |
| γ_{Qsfav} | Coefficiente parziale sfavorevole sulle azioni variabili |
| γ_{Qfav} | Coefficiente parziale favorevole sulle azioni variabili |
| $\gamma_{\tan\phi'}$ | Coefficiente parziale di riduzione dell'angolo di attrito drenato |
| $\gamma_{c'}$ | Coefficiente parziale di riduzione della coesione drenata |
| γ_{cu} | Coefficiente parziale di riduzione della coesione non drenata |



- γ_{qu} Coefficiente parziale di riduzione del carico ultimo
 γ_{γ} Coefficiente parziale di riduzione della resistenza a compressione uniassiale delle rocce

Per quanto riguarda i coefficienti γ_R , che agiscono direttamente sulla Resistenza del sistema, questi variano in funzione dell'opera che si realizza. Nel seguito si descriveranno brevemente le verifiche agli SLU che debbono essere eseguite sulle opere di sostegno quali muri, sulle opere in sotterraneo, sulle opere di materiali sciolti e fronti di scavo e infine sui depositi di inerti. Nelle verifiche di sicurezza devono essere presi in considerazione tutti i meccanismi di stato limite ultimo, sia a breve sia a lungo termine.

Opere di materiali sciolti, fronti di scavo e depositi di inerti

Le presenti norme si applicano ai manufatti di materiali sciolti, quali rilevati, argini di difesa per fiumi, canali e litorali, rinfianchi, rinterri, terrapieni e colmate, scavi per la formazione di piazzali e/o trincee e allo stesso modo ai depositi di inerti a cui si può far riferimento nel caso dei "ravaneti". Nelle verifiche che interessano il corpo del deposito, si devono attribuire parametri che tengano conto della natura e delle modalità di compattazione del materiale nonché dei risultati di specifiche prove in sito o di laboratorio. In questo caso le verifiche agli stati limite ultimi devono essere eseguite secondo la Combinazione 2 dell'Approccio 1 (dunque la combinazione di coefficienti A2-M2-R2) con il valori dei coefficienti γ_R pari a 1,1.



Progettazione sismica

Le azioni sismiche di progetto, in base alle quali valutare il rispetto dei diversi stati limite considerati, si definiscono a partire dalla “pericolosità sismica di base” del sito di costruzione e sono funzione delle caratteristiche morfologiche e stratigrafiche che determinano la risposta sismica locale. La pericolosità sismica è definita in termini di accelerazione orizzontale massima attesa a_g in condizioni di campo libero su sito di riferimento rigido con superficie topografica orizzontale (di categoria A come definita al § 3.2.2), nonché di ordinate dello spettro di risposta elastico in accelerazione ad essa corrispondente $Se_{(T)}$, con riferimento a prefissate probabilità di eccedenza P_{VR} nel periodo di riferimento V_R . Ai fini della presente normativa le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento P_{VR} nel periodo di riferimento V_R , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

a_g = accelerazione orizzontale massima al sito

F_o = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

T_c = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale

Per il generico sito in esame la stima dei parametri spettrali necessari per la definizione dell'azione sismica di progetto viene infatti effettuata utilizzando le informazioni disponibili nel reticolo di riferimento (riportato nella Tabella 1 dell'Allegato B del D.M.).

Le forme spettrali previste dalle Norme Tecniche per le Costruzioni sono caratterizzate da prescelte probabilità di superamento e vite di riferimento. A tal fine occorre fissare:

- la vita di riferimento V_R della costruzione.
- le probabilità di superamento nella vita di riferimento P_{VR} associate a ciascuno degli stadi limite considerati,

per individuare infine, a partire dai dati di pericolosità sismica disponibili, le corrispondenti azioni sismiche.

Come detto le azioni sismiche vengono valutate su ciascuna costruzione in relazione ad un periodo di riferimento V_R che si ricava moltiplicando la vita nominale V_N dell'opera per il coefficiente d'uso C_U :

$$V_R = V_N * C_U$$



La vita nominale di un'opera strutturale V_N è convenzionalmente definita come il numero di anni nel quale è previsto che l'opera, purché soggetta alla necessaria manutenzione, mantenga specifici livelli prestazionali.

| TIPI DI COSTRUZIONE | | Valori minimi V_N (in anni) |
|---------------------|---|----------------------------------|
| 1 | Costruzioni temporanee e provvisorie | ≤ 10 |
| 2 | Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari | ≥ 50 |
| 3 | Costruzioni con livelli di prestazioni elevati | ≥ 100 |

Le verifiche sismiche di opere di tipo 1 o in fase di costruzione possono omettersi quando il progetto preveda che tale condizione permanga per meno di 2 anni.

In presenza di azioni sismiche, con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso, le costruzioni sono suddivise in classi d'uso così definite:

Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.

Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Industrie con attività non pericolose per l'ambiente. Ponti, opere infrastrutturali, reti viarie non ricadenti in Classe d'uso *III* o in Classe d'uso *IV*, reti ferroviarie la cui interruzione non provochi situazioni di emergenza. Dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti.

Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi. Industrie con attività pericolose per l'ambiente. Reti viarie extraurbane non ricadenti in Classe d'uso *IV*. Ponti e reti ferroviarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza. Dighe rilevanti per le conseguenze di un loro eventuale collasso.

Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, anche con riferimento alla gestione della protezione civile in caso di calamità. Industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente. Reti viarie di tipo A o B, di cui al D.M. 5 novembre 2001, n. 6792, "Norme funzionali e geometriche per la costruzione delle strade", e di tipo C quando appartenenti ad itinerari di collegamento tra capoluoghi di provincia non altresì serviti da strade di tipo A o B. Ponti e reti ferroviarie di importanza critica per il mantenimento delle vie di comunicazione, particolarmente dopo un evento sismico. Dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica.

Il valore del coefficiente d'uso C_U è definito, al variare della classe d'uso, come mostrato nella seguente tabella:

| CLASSE D'USO | I | II | III | IV |
|--------------------|-----|-----|-----|-----|
| COEFFICIENTE C_U | 0,7 | 1,0 | 1,5 | 2,0 |



L'individuazione delle azioni sismiche deve essere possibile per tutte le vite di riferimento e tutti gli stati limite considerati dalle NTC; a tal fine è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la pericolosità sismica, il periodo di ritorno dell'azione sismica T_R , espresso in anni. Fissata la vita di riferimento V_R , i due parametri T_R e P_{VR} sono immediatamente

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante l'espressione:

Il valore di P_{VR} varia in funzione degli stati limite, quali Stato Limite di Operatività (SLO) e Stato Limite di Danno (SLD) per quanto riguarda gli stati limite di esercizio; Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV) e Stato Limite di prevenzione del Collasso (SLC) per quanto riguarda gli stati limite ultimi, i quali devono essere individuati riferendosi alle prestazioni della costruzione nel suo complesso. In mancanza di espresse indicazioni in merito, il rispetto dei vari stati limite si considera conseguito nei confronti di tutti gli stati limite ultimi qualora siano rispettate le indicazioni progettuali e costruttive e siano soddisfatte le verifiche relative al solo SLV.

Lo SLV sta ad indicare che a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali.

Le probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} , cui riferirsi per individuare l'azione sismica agente in ciascuno degli stati limite considerati, sono riportate nella tabella successiva.

| Stati Limite | | PVR : Probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R |
|---------------------------|-----|---|
| Stati limite di esercizio | SLO | 81% |
| | SLD | 63% |
| Stati limite ultimi | SLV | 10% |
| | SLC | 5% |



Qualora la attuale pericolosità sismica su reticolo di riferimento non contempli il periodo di ritorno T_R corrispondente alla V_R e alla P_{VR} fissate, il valore del generico parametro p (a_g , F_0 , T_C^*) ad esso corrispondente potrà essere ricavato per interpolazione, a partire dai dati relativi ai T_R previsti nella pericolosità sismica, utilizzando la seguente espressione:

$$\log(p) = \log(p_1) + \log\left(\frac{p_2}{p_1}\right) * \log\left(\frac{T_R}{T_{R1}}\right) * \left[\log\left(\frac{T_{R2}}{T_{R1}}\right)\right]^{-1}$$

nella quale:

p è il valore del parametro di interesse corrispondente al periodo di ritorno T_R desiderato
 T_{R1}, T_{R2} sono i periodi di ritorno più prossimi a T_R per i quali si dispone dei valori p_1, p_2 del generico parametro p

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, si rende necessario valutare l'effetto della risposta sismica locale del sito in esame. In assenza di analisi più dettagliate si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sull'individuazione di categorie di sottosuolo di riferimento come mostrato dalla seguente tabella:

| Categoria | Descrizione |
|-----------|--|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s. |
| C | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |
| D | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 m/s e 180 m/s. |
| E | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m. |

Nello spettro di risposta di progetto le caratteristiche di sito sono introdotte tramite un coefficiente S che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la seguente relazione:

$$S = S_s \times S_T$$

dove S_s è il coefficiente di amplificazione stratigrafica e S_T è il coefficiente di amplificazione



topografica. Il coefficiente S_s si può ricavare dalla seguente tabella che lo lega alla categoria di sottosuolo di riferimento.

| Categoria di sottosuolo | S_s |
|-------------------------|---|
| A | 1,00 |
| B | $1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,20$ |
| C | $1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,50$ |
| D | $0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,80$ |
| E | $1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot a_g / g \leq 1,60$ |

Tabella 3.2.IV

Relativamente al coefficiente di amplificazione topografica S_T , si può fare riferimento alla seguente tabella dove sono indicate le varie caratteristiche della superficie topografica che possono generare amplificazione sismica.

| Categoria topografica | Caratteristiche della superficie topografica | Coefficiente topografico S_T |
|-----------------------|---|--------------------------------|
| T1 | Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$ | 1,0 |
| T2 | Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$ | 1,2 |
| T3 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$ | 1,2 |
| T4 | Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$ | 1,4 |

Tabella 3.2.III

Nel § 7.11 si disciplinano la progettazione e la verifica delle opere e dei sistemi geotecnici quali stabilità dei pendii, fronti di scavo e rilevati, opere di sostegno soggetti ad azioni sismiche, nonché i requisiti che devono essere soddisfatti dai siti di costruzione e dai terreni interagenti con le opere in presenza di tali azioni. In aggiunta alle prescrizioni contenute nel paragrafo citato, le opere e i sistemi geotecnici devono soddisfare le prescrizioni contenute nel capitolo 6 delle norme, relative alle combinazioni di carico non sismico.

Sotto l'effetto dell'azione sismica di progetto le opere e i sistemi geotecnici devono rispettare gli stati limite ultimi e di esercizio. Le verifiche agli stati limite ultimi di opere e sistemi geotecnici si riferiscono al solo stato limite di salvaguardia della vita (*SLV*) mentre quelle agli stati limite di esercizio si riferiscono al solo stato limite di danno (*SLD*).

Le verifiche degli stati limite ultimi in presenza di azioni sismiche devono essere eseguite ponendo pari a 1 i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto, con i coefficienti parziali γ_R indicati nel capitolo 7, oppure con i γ_R indicati nel capitolo 6 laddove non espressamente specificato.



L'analisi di stabilità in condizioni sismiche può essere eseguita mediante metodi pseudostatici. In questi metodi l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso (W) del volume potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come:

$$F_h = k_h \times W$$

$$F_v = k_v \times W$$

con k_h e k_v rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale:

$$k_h = \beta_s \cdot \frac{a_{\max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0.5 \times k_h$$

dove β_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

a_{\max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito

g = accelerazione di gravità

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa al sito può essere valutata con la relazione

$$a_{\max} = S \times a_g = S_s \times S_T \times a_g$$

Il valore del coefficiente β_s è indicato nei vari paragrafi del capitolo 7 in funzione dell'opera che si realizza.

Opere di materiali sciolti, fronti di scavo e depositi di inerti

Per quanto riguarda le presenti opere il valore del coefficiente β_s assume i valori:

$$\beta_s = 0.38 \text{ nelle verifiche allo stato limite ultimo (SLV)}$$

$$\beta_s = 0.47 \text{ nelle verifiche allo stato limite di esercizio (SLD).}$$

Nelle verifiche di sicurezza delle presenti opere si deve controllare che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$.