

Comune di SMERILLO

Provincia di Fermo

INTERVENTI DI MESSA IN SICUREZZA CON CONSOLIDAMENTO E RIPRISTINO DISSESTI IDROGEOLOGICI SULLA RUPE DENOMINATA "FESSA" DI SMERILLO

PROGETTO ESECUTIVO

FASCICOLO DI CALCOLO

16

- Relazione sui materiali
- Verifica intervento chiodatura
- Simulazione traiettoria di caduta massi

DICEMBRE 2020

Ubicazione

Rupe - Capoluogo

Proprietà

COMUNE DI SMERILLO

Progettisti

Ing. Luca CORAZZA

Cod. Fisc. CRZ LCU 66D22 D542L

Via C. Battisti, 70 - 63821 Porto Sant'Elpidio (FM)

P.IVA 01679170447 Tel.: 0734-810783

Geom. Ugo Bruni

Cod. Fisc. BRNGUO59H11A252Y

Via C. Battisti, 26 - 63857 - Amandolo (FM)

Tel.: 0734-848304

RELAZIONE
SUI
MATERIALI IMPIEGATI

Indice

INDICE	2
RELAZIONE SUI MATERIALI IMPIEGATI	3
1.1 CALCESTRUZZO	3
1.2 ACCIAI PER C.C.A. (fondazione-chiodature)	3
1.3 ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA – barriere paramassi – ringhiera Belvedere	4
1.3.1 Caratteristiche minime Acciaio	4
1.3.2 Bulloneria	4
1.4 RETI DI ACCIAIO	5

RELAZIONE SUI MATERIALI IMPIEGATI

1.1 CALCESTRUZZO

Riferimenti: D.M. 17.01.2018, par. 11.2;

<u>Tipologia strutturale:</u>	<u>Opere di fondazione muretti e soletta sotto pavimentazioni e per barriere paramassi</u>
Classe di resistenza necessaria ai fini statici:	C25/30
Condizioni ambientali:	Ambiente bagnato, raramente asciutto
Classe di esposizione:	XC2
Rapporto acqua/cemento max:	0.60
Classe di consistenza:	S4 (fluida)
Diametro massimo aggregati:	30 mm

<u>Tipologia strutturale:</u>	<u>Opere esterne (muretti zona Belvedere)</u>
Classe di resistenza necessaria ai fini statici:	C25/30
Condizioni ambientali:	Ambiente asciutto
Classe di esposizione:	XC1inerti
Rapporto acqua/cemento max:	0.60
Classe di consistenza:	S4 (fluida)
Diametro massimo aggregati:	30 mm

<u>Tipologia strutturale:</u>	<u>Boiacca per iniezioni</u>
Classe di resistenza necessaria ai fini statici:	C25/30
Condizioni ambientali:	Ambiente bagnato
Classe di esposizione:	XC2
Rapporto acqua/cemento max:	0.60
Classe di consistenza:	S5 (superfluida)
Diametro massimo aggregati:	3 mm (sabbia)

Dosatura dei materiali.

La dosatura dei materiali per ottenere Rck 300 è orientativamente la seguente (per m³ d'impasto).

sabbia	0.4 m ³
ghiaia	0.8 m ³
acqua	150 litri
cemento tipo 325	350 kg/m ³

1.2 ACCIAI PER C.C.A. (fondazione-chiodature)

Le armature metalliche saranno costituite da acciaio saldabile e qualificato secondo le procedure di cui ai punti 11.3.1.2 11.3.2 del D.M. 2018:

Tipo acciaio B450C

fv nom = 450 N/mm² – Tensione nominale di snervamento

ft nom = 540 N/mm² – Tensione nominale di rottura

f_{yk} = 450 N/mm² – Tensione caratteristica di snervamento
 f_{tk} = 540 N/mm² – Tensione caratteristica di rottura
 t aderenza = 2.6 N/mm²

All'atto della posa in opera gli acciai devono presentarsi privi di ossidazione, corrosione, difetti superficiali visibili e pieghe. È tollerata una ossidazione che scompaia totalmente mediante sfregamento con un panno asciutto. Non è ammessa in cantiere alcuna operazione di raddrizzamento.

1.3 ACCIAIO PER CARPENTERIA METALLICA – barriere paramassi – ringhiera Belvedere

Proprietà dei materiali per la fase di analisi strutturale

Modulo Elastico: $E = 2.100.000 \text{ kg/cm}^2$ (210.000 N/mm²)

Coefficiente di Poisson: $\nu = 0.3$

Modulo di elasticità trasversale: $G = E / [2*(1+\nu)]$ (N/mm²)

Coefficiente di espansione termica lineare: $\alpha = 12*10^{-6}$ per °C⁻¹ (per $T < 100^\circ\text{C}$)

Densità: $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$

1.3.1 Caratteristiche minime Acciaio

	S235	S275	S355	S355
tensione di rottura	360 N/mm ²	430 N/mm ²	510 N/mm ²	550 N/mm ²
tensione di snervamento	235 N/mm ²	275 N/mm ²	355 N/mm ²	440 mm ²

1.3.2 Bulloneria

Nelle unioni con bulloni si assumono le seguenti resistenze di calcolo:

STATO DI TENSIONE					
CLASSE VITE	f_{tb} (N/mm ²)	f_{yb} (N/mm ²)	$f_{k,N}$ (N/mm ²)	$f_{d,N}$ (N/mm ²)	$f_{d,v}$ (N/mm ²)
4.6	400	240	240	240	170
5.6	500	300	300	300	212
6.8	600	480	360	360	255
8.8	800	640	560	560	396
10.9	1000	900	700	700	495

legenda:

$f_{k,N}$ è assunto pari al minore dei due valori $f_{k,N} = 0.7 f_t$ ($f_{k,N} = 0.6 f_t$ per viti di classe 6.8)

$f_{k,N} = f_y$ essendo f_{tb} ed f_{yb} le tensioni di rottura e di snervamento

$f_{d,N} = f_{k,N}$ = resistenza di calcolo a trazione

$f_{d,v} = f_{k,N} / \sqrt{2}$ = resistenza di calcolo a taglio

1.4 RETI DI ACCIAIO

Diametro filo 3.00 mm

Diametro trefolo 12.00mm

Carico minimo rottura anello 248KN

Porto Sant'Elpidio, li 28/12/2020

f.to Il Progettista e Direttore Lavori

VERIFICA INTERVENTO DI CHIODATURA

Strumento software utilizzato: RockPlane

Le verifiche in menzione sono state condotte nell'ipotesi di equilibrio limite ed in particolare riferendosi alla formulazione di seguito riportata che, ipotizza la presenza della spinta idrostatica, nella frattura che delimita a monte il volume di roccia, e della forza sismica.

Si riportano nel seguito i significati dei parametri e delle grandezze che intervengono nella scrittura delle equazioni utilizzate per risolvere il problema.

Abbiamo dunque che:

$$T = \sigma_n \cdot \tan(\varphi + i_{eff})$$

$$i_{eff} = JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n}$$

$$Area = f(\psi_e, \psi_i, s, h, l, \alpha, \delta)$$

$$S_w = \frac{1}{2} \cdot H_w^2 \cdot \frac{1}{\sin \psi_i}$$

$$\alpha' = f(\psi_e, \psi_i, s, h, l, \alpha, \delta)$$

$$W = Area \cdot \gamma$$

γ	= Peso dell'unità di volume della roccia
ψ_e	= Inclinazione parete esterna
ψ_i	= Inclinazione parete interna
δ	= Inclinazione in testa al blocco
s	= Spessore del blocco
h	= Altezza blocco
l	= Larghezza blocco
k	= Coefficiente di intensità sismica
α	= Inclinazione della base del blocco
R_q	= Risultante tirante
β	= Inclinazione risultante tirante
φ	= Angolo di attrito di base delle discontinuità
S_w	= Spinta dell'acqua sulla discontinuità di monte
x_g	= Ascissa baricentro blocco
y_g	= Ordinata baricentro blocco
x_t	= Ascissa punto di applicazione risultante tirante
y_t	= Ordinata punto di applicazione risultante tirante
y_w	= Ordinata punto di applicazione spinta acqua
γ_w	= Peso dell'unità di volume dell'acqua
H_w	= Altezza d'acqua spingente
JRC	= Parametro adimensionale rappresentativo della scabrezza
JCS	= Indica la resistenza a compressione del giunto
σ_n	= Tensione normale sulla base del blocco

Scrivendo le equazioni di equilibrio ed assumendo per la resistenza a taglio sulla discontinuità di base la relazione di Mohr-

Coulomb, con le indicazioni precedentemente esplicitate, possiamo pervenire alle relazioni che esprimono il fattore di sicurezza allo scorrimento, la forza esterna stabilizzante necessaria ad assicurare un assegnato valore del fattore di sicurezza a scorrimento, il fattore di sicurezza a ribaltamento.

1a) *Fattore di sicurezza a scorrimento*

$$F_s = \frac{[W \cdot \cos \alpha - kW \cdot \sin \alpha + R_q \cdot \sin(\alpha + \beta) - S_w \cdot \sin(\alpha')]}{W \cdot \sin \alpha + kW \cdot \cos \alpha - R_q \cdot \cos(\alpha + \beta) + S_w \cdot \cos(\alpha')}$$

2a) *Forza esterna stabilizzante necessaria ad assicurare un assegnato fattore di sicurezza a scorrimento (Fs)*

$$R_q = \frac{S_w \cdot \sin \alpha \cdot \tan(\varphi + i_{eff}) + F_s \cdot W \cdot \sin \alpha + F_s \cdot S_w \cdot \cos \alpha' - W \cdot \cos \alpha \cdot \tan(\varphi + i_{eff}) + F_s \cdot K \cdot W \cdot \cos(\alpha)}{F_s \cdot \cos(\alpha + \beta) + \sin(\alpha + \beta) \cdot \tan(\varphi + i_{eff})}$$

3a) *Fattore di sicurezza a ribaltamento*

$$F_r = \frac{W \cdot x_g + R_q \cdot (y_t \cdot \cos \beta + x_t \cdot \sin \beta)}{K \cdot W \cdot y_g + S_w \cdot \cos(90^\circ - \psi_t) \cdot [y_w + x_w \cdot \tan \alpha']}$$

Come già precisato nelle verifiche, tenuto conto nel particolare contesto in cui si colloca l'intervento, si è ritenuto opportuno assumere, cautelativamente, condizioni che in generale risultano sicuramente gravose (frattura di monte completamente riempita d'acqua, presenza di forza dovuta ad azioni sismiche), ma che non è opportuno escludere.

La procedura utilizza una fase preliminare di progetto sviluppata imponendo un assegnato valore al fattore di sicurezza allo scorrimento e calcolando il valore totale della forza esterna necessaria.

Calcolato lo sforzo nel tirante di progetto viene definito il numero di tiranti e stabilita la posizione degli stessi.

A questo punto, riferendosi alla configurazione finale di progetto, sono di nuovo calcolati i fattori di sicurezza allo scorrimento ed al ribaltamento. Per tali valori si è assunto come riferimento il valore 1.30.

Per il calcolo dello sforzo nel tirante di progetto si è seguita la procedura di seguito riportata.

Riferendosi alla seguente notazione:

D	=	Diametro della fondazione
l_f	=	Lunghezza della fondazione
γ	=	Peso unità di volume della roccia di ancoraggio
K	=	Coefficiente funzione dell'angolo di attrito roccia di ancoraggio
t	=	Profondità media tirante
d	=	Diametro del tirante
σ_{ys}	=	Tensione corrispondente al limite elastico convenzionale dell'acciaio
τ_{ad}	=	Tensione tangenziale ammissibile di aderenza

Tiro di progetto tirante singolo

1b) *Tiro limite ultimo tirante in terreni incoerenti*

$$N_{fu} = \pi \cdot D \cdot l_f \cdot K \cdot \gamma \cdot t$$

2b) *Aderenza acciaio - cls*

$$N_{ad} = \pi \cdot d \cdot l_f \cdot \tau_{ad}$$

3b) *Resistenza ultima armatura*

$$N_{st} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot \sigma_{ys}$$

Si assume come *Sforzo di Progetto* il minimo tra gli sforzi N_{fu}

Il fattore di sicurezza da applicare al tiro limite ultimo N_{fu} viene valutato sulla base delle seguenti considerazioni:

Gli stati limite ultimi (6.6.2 Verifiche di sicurezza SLU NTC 2018) dei tiranti di ancoraggio si riferiscono allo sviluppo di meccanismi di collasso determinati dalla mobilitazione della resistenza del terreno e al raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che li compongono.

Per il dimensionamento geotecnico, deve risultare rispettata la condizione $E_d < R_d$ con specifico riferimento ad uno stato limite di sfilamento della fondazione di ancoraggio. La verifica di tale condizione può essere effettuata con riferimento alla combinazione A1+M1+R3, tenendo conto dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.6.I (NTC 2018). La verifica a sfilamento della fondazione dell'ancoraggio si esegue confrontando la massima azione di progetto P_d , considerando tutti i possibili stati limite ultimi (SLU) e di esercizio (SLE), con la resistenza di progetto $R_{d,ad}$, determinata applicando alla resistenza caratteristica R_{ak} i fattori parziali γ_R riportati nella Tab. 6.6.I.

	Simbolo γ_R	Coefficiente parziale
Temporanei	$\gamma_{Ra,t}$	1,1
Permanenti	$\gamma_{Ra,p}$	1,2

Tab. 6.6.I – Coefficienti parziali per la resistenza di ancoraggi

Il valore della resistenza caratteristica R_{ak} è il minore dei valori derivanti dall'applicazione dei fattori di correlazione ξ_{a3} e ξ_{a4} rispettivamente al valor medio e al valor minimo delle resistenze $R_{a,c}$ ottenute dal calcolo. Per la valutazione dei fattori ξ_{a3} e ξ_{a4} , si deve tener conto che i profili di indagine sono solo quelli che consentono la completa identificazione del modello geotecnico di sottosuolo per il terreno di fondazione dell'ancoraggio.

$$R_{ak} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{a,c})_{medio}}{\xi_{a3}}, \frac{(R_{a,c})_{min}}{\xi_{a4}} \right\}$$

Nella valutazione analitica della resistenza allo sfilamento degli ancoraggi non si applicano coefficienti parziali di sicurezza sui valori caratteristici della resistenza del terreno; si fa quindi riferimento ai coefficienti parziali di sicurezza M1.

Numero di profili di indagine	1	2	3	4	≥ 5
ξ_{a3}	1,80	1,75	1,70	1,65	1,60
ξ_{a4}	1,80	1,70	1,65	1,60	1,55

Tab. 6.6.III – Fattori di correlazione per derivare la resistenza caratteristica dalle prove geotecniche, in funzione del numero n di profili di indagine

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: B
 Categoria topografica: T4

S.L. Stato limite	TR Tempo ritorno [anni]	ag [m/s ²]	F0 [-]	TC* [sec]
S.L.O.	30.0	0.56	2.49	0.28
S.L.D.	50.0	0.71	2.46	0.29
S.L.V.	475.0	1.75	2.47	0.34
S.L.C.	975.0	2.26	2.5	0.35

Coefficienti sismici orizzontali e verticali

Opera: Classe II

S.L. Stato limite	amax [m/s ²]	beta [-]	kh [-]	kv [sec]
S.L.O.	0.9408	1.0	0.0959	0.048
S.L.D.	1.1928	0.47	0.0572	0.0286
S.L.V.	2.94	0.38	0.1139	0.057
S.L.C.	3.7004	1.0	0.3774	0.1887

DATI GENERALI

Peso di volume della roccia 23.0 kN/m³
 Coefficiente sismico kx 0.11
 Coefficiente sismico ky 0.06
 Attrito sul piano di scorrimento 27 °
 Coesione 220 kPa
 Coefficiente JRC 4
 Coefficiente JCS 45 Mpa

CARATTERISTICHE OPERE INTEVENTO

Diametro della fondazione 0.12 m
 Lunghezza della fondazione 5 m
 Peso spec. roccia di ancoraggio 23 kN/m³
 Attrito terreno di ancoraggio 18 °
 Fattore di sicurezza sul tiro ultimo 2.1
 Diametro armatura 24 mm
 Resistenza di calcolo armatura 391 N/mm²
 Tasso di lavoro armatura 90 %
 Aderenza acciaio cls 2.7 N/mm²

DIMENSIONAMENTO STRUTTURA

Forza limite ultima fondazione 610.73 KN
 Sfilamento acciaio dalla fondazione 1017.88 KN
 Forza limite ultima armatura 132.37 KN
 Tiro di progetto 132.37 KN

DATI BLOCCO

Altezza blocco	1.1 m
Spessore	0.2 m
Larghezza del blocco	1.6 m
Inclinazione sup. interna	85 °
Inclinazione sup. esterna	80 °
Inclinazione piano di scorrimento	10 °
Inclinazione testa - da cresta in poi	65 °
Altezza acqua spingente	0 m

ANALISI CON CHIODI

FASE DI PROGETTO

CARATTERISTICHE BLOCCO

Area blocco	0.261 m ²
Peso Blocco	10 KN
Coordinate baricentro (x,y)	0.21 / 0.62 m
Ieff 13.24	°

FATTORE DI SICUREZZA IMPOSTO

Per avere un fattore di sicurezza pari a	2.5
Occorre uno sforzo (Rq) pari a	191.33 KN
Inclinato di (Beta)	10.0 °
Da distribuire su una superficie di	1.76 m ²

NUMERO DI TIRANTI DA UTILIZZARE

Numero di tiranti da utilizzare	1
Da distribuire su una superficie di	1.76 m ²

VERIFICA

POSIZIONE TIRANTI Interasse orizzontale..	3 m
Chiodo n°	1
Sforzo Chiodo	10 KN
Inclinazione	5 °
Ordinata punto di applicazione	0.75 m
Numero di tiranti utilizzati	1
Sforzo risultante	5.333 KN
Inclinazione risultante (Beta)	5.0 °
Coordinate risultante (Xrq, Yrq)	0.066 / 0.75 m
Fs sicurezza scorrimento	37.555
Fr sicurezza ribaltamento	8.656

VERIFICA TENSIONI ARMATURA

Tensione a trazione armatura
Tensione tangenziale

22.126 N/mm²
0.837 N/mm²

SIMULAZIONE TRAIETTORIA DI CADUTA MASSI

Studio della caduta dei massi – teoria

Per caduta massi s'intende il fenomeno di distacco e di successivo movimento verso valle di blocchi per lo più isolati e volumetricamente limitati (fino ad un massimo di alcuni metri cubi) da pareti rocciose particolarmente acclivi e tettonicamente disturbate. Il passaggio fra questo tipo di fenomeno gravitativo e le frane di crollo vere e proprie nella realtà è piuttosto sfumato: spesso viene fissato attraverso un criterio geometrico, classificando come frane di crollo quegli eventi che coinvolgono almeno alcune centinaia di metri cubi di materiale roccioso. Nella pratica ingegneristica è più utile però un criterio di tipo meccanico. Secondo tale criterio vanno trattati come fenomeni franosi quei movimenti gravitativi che mettono in gioco un'energia cinetica superiore a quella normalmente assorbibile dalle normali opere di difesa di tipo passivo (barriere e terrapieni paramassi, ecc.). Tale limite energetico può essere posto intorno ai 2000 kJoule.

Lo studio del fenomeno di caduta massi ha lo scopo di individuare con una approssimazione accettabile:

- la massima distanza percorribile dal masso distaccato;
- la traiettoria più probabile o più sfavorevole per la realizzazione delle opere di difesa;
- la massima energia d'impatto che dovrà essere dissipata dalla singola opera di difesa.

A tal fine l'analisi del problema dovrà essere effettuata in due fasi distinte:

- fase di rilievo in campagna dei dati relativi a distacchi avvenuti in passato;
- fase di simulazione numerica complessiva dei distacchi prevedibili per il futuro.

Analisi del fenomeno di caduta massi

Simulazione numerica

Calibratura del modello

La simulazione numerica del fenomeno di caduta massi ha lo scopo di permettere la costruzione di un modello che permetta di fare delle previsioni sul comportamento cinematico di singoli blocchi rocciosi distaccatisi dal versante.

La calibratura del modello va effettuata sulla base dei dati acquisiti in campagna e non può essere considerata accettabile, se non è in grado di riprodurre la situazione osservata (traiettorie dei massi, distribuzione degli stessi al piede del versante, ecc...).

Nel modello il moto viene supposto bidimensionale, cioè svolgentesi nel piano x,z, con il pendio discretizzato in una serie di segmenti retti. Il masso inoltre può essere supposto puntiforme, considerando cioè solo il moto del suo baricentro, o approssimato ad un ellissoide triassiale.

Il modello richiede che vengano determinate due serie di parametri, una riguardante il blocco in caduta, l'altra il versante.

1) Parametri del blocco roccioso: è richiesta l'introduzione delle seguenti grandezze:

- volume del masso;
- dimensione dei semiassi **a,b,c** dell'ellissoide che approssima il masso;
- peso di volume apparente del blocco;
- velocità iniziale lungo gli assi x e z (diversa da zero se il blocco è sollecitato inizialmente da altre forze oltre alla forza di gravità, per es. da un evento sismico);
- eventualmente, minima energia d'impatto necessaria per la frantumazione del masso.

2) Parametri del versante:

E' richiesta l'introduzione per ogni singolo tratto di pendio di alcuni parametri necessari per il calcolo dell'interazione masso-versante.

a) Coefficiente di restituzione (E)

Viene definito come il rapporto fra la velocità prima e dopo (V_1 / V_0 dove V_1 è la velocità dopo l'urto, V_0 prima dell'urto) l'impatto del masso con il terreno; è uguale a zero nel caso di un urto completamente anelastico (tutta l'energia cinetica del blocco impattante viene dissipata sotto forma di calore e la velocità del masso dopo l'urto è uguale a zero), uguale a uno nel caso di urto completamente elastico (tutta l'energia cinetica viene conservata ed il masso avrà una velocità dopo l'impatto uguale a quella precedente l'urto, cioè $V_1 = V_0$) e compreso fra 0 e 1 nel caso di urto parzialmente elastico (parte dell'energia cinetica viene conservata e parte dissipata sotto forma di calore; la velocità del masso sarà data da $V_1 = E \times V_0$).

Il valore di E è legato principalmente alla litologia ed alla morfologia del versante. Broili (1979) propone di assumere indicativamente valori di E compresi fra 0.75 e 0.8 per impatti su roccia o detrito di grossa pezzatura e tra 0.2 e 0.35 per impatti su materiale terroso.

Altri Autori (Mazzalai, Vuillermin, 1995) propongono invece i seguenti valori indicativi:

Tipo substrato	E
apice di conoide detritico	0,05 - 0,10
bosco con sottobosco sviluppato, prato	0,05 - 0,15
copertura detritica con vegetazione folta	0,10 - 0,15
copertura detritica con vegetazione rada	0,20 - 0,30
detrito eluviale di spessore ridotto	0,30 - 0,40
strutture rigide e strade	0,40 - 0,60
roccia affiorante fratturata	0,60 - 0,70
roccia affiorante integra	0,75 - 0,85

Volendo distinguere le componenti normale e tangenziale della velocità del blocco in caduta, si possono definire i parametri E_y e E_x (coefficienti di restituzione normale e tangenziale) come segue:

$E_y = V_{1n} / V_{0n}$ [V_{1n} = velocità normale (perpendicolare alla superficie topografica) del masso dopo l'urto; V_{0n} = velocità normale del masso prima dell'urto];

$E_x = V_{1t} / V_{0t}$ [V_{1t} = velocità tangenziale (parallela alla superficie topografica) del masso dopo l'urto; V_{0t} = velocità tangenziale del masso prima dell'urto].

Per i valori indicativi di E_y e E_x si presentano qui quelli proposti da Piteau e Clayton (1987) e da Hoek (1987).

Piteau e Clayton

Tipo substrato	E_y	E_x
Roccia compatta	0,8 - 0,9	0,65-0,75
Detrito misto a grossi massi	0,5 - 0,8	0,45-0,65
Detrito compatto con piccoli massi	0,4 - 0,5	0,35-0,45
Scarpare ricoperte da vegetazione	0,2 - 0,4	0,2 - 0,3

Hoek

Tipo substrato	E_y	E_x
Roccia compatta e pulita	0,53	0,99
Strada asfaltata	0,40	0,90
Roccia coperta con grossi massi	0,35	0,85
Conoidi di detrito	0,32	0,82
Conoidi di detrito con vegetazione	0,32	0,80
Suolo soffice	0,30	0,80

b) Angolo d'attrito masso-versante (ϕ)

Nei tratti di pendio in cui il masso si muove rotolando o scivolando, l'energia cinetica viene dissipata attraverso l'attrito che si sviluppa fra blocco e versante. Quest'attrito viene introdotto nel calcolo attraverso il parametro angolo d'attrito masso-versante. Nel caso di un blocco che rotola ϕ generalmente possiede valori compresi fra 20° e 35° , con i valori inferiori corrispondenti a tratti di pendio in roccia e privi di scabrosità. Nel caso di un blocco che scivola (per es. nel caso di un masso lastriforme che si muove tenendo a contatto con il terreno la faccia arealmente più estesa) l'attrito ovviamente è superiore. Cocco (1991) propone di considerare per la stima dell'angolo d'attrito terra-masso in fase di rotolamento tre componenti distinte legate rispettivamente alla natura del terreno, alla copertura vegetale e alle asperità

del terreno in relazione alle dimensioni del masso. Ogni componente fornisce un contributo, dalla cui somma si ottiene l'angolo d'attrito totale. Questi i valori dei parametri parziali:

Natura del terreno	Contributo parziale (°)
Roccia nuda	19,5
Detrito	21,0
Alluvioni	26,5
Morena	26,5
Copertura vegetale	Contributo parziale (°)
Terreno nudo	0,0
Prato	3,0
Arbusti	3,5
Frutteto	6,0
Bosco ceduo	4,5
Bosco d'alto fusto	8,5
Asperità del terreno	Contributo parziale (°)
Nessuna	0
Piccola	3
Media	7
Elevata	11

c) Frammentazione di un blocco

Massi che presentano al loro interno superfici di debolezza meccanica (per es. giunti di strato) possono, in seguito ad un impatto violento, dividersi in due o più frammenti che proseguono il loro movimento verso il piede del versante in maniera indipendente. La frammentazione avviene più probabilmente in tratti ben delimitati del pendio in seguito, per esempio, ad impatto con ostacoli rigidi. Nella modellazione del fenomeno, si può operare inserendo un valore di energia minima d'impatto per il masso oltre la quale si ha la sua rottura, oppure, sulla base delle osservazioni effettuate in campagna, si può definire la probabilità, per ogni tratto di versante, che in seguito ad un urto il blocco si frantumi (una probabilità di frantumazione del 20% in questo caso indicherebbe che il 20% dei massi che colpiscono quel tratto di pendio si frantumano).

Non può invece essere presa in considerazione la possibilità di frantumazione esplosiva del blocco roccioso, che si può verificare, in seguito ad impatti particolarmente violenti, per la propagazione di un'onda d'urto all'interno del masso. Non è ancora stata messa a punto, infatti, una procedura matematica per la simulazione di questi eventi, caratterizzati da una velocità dei frammenti molto elevata (30-70 m/s) e da traiettorie di notevole gittata (50-160 m) (Paronuzzi, 1989).

I parametri qui definiti ed in particolare quelli relativi all'interazione masso-versante andranno inseriti nel modello procedendo a tentativi, fino ad ottenere simulazioni di distacchi con traiettorie compatibili con quelle osservate o ricostruite sul terreno.

Equazioni del moto

Trascurando la resistenza dell'aria, le forze che condizionano il moto del masso in movimento lungo il versante sono la forza di gravità e l'attrito masso-pendio.

Vengono distinti nella simulazione numerica i tratti di versante in cui il moto avviene per caduta libera da quelli in cui avviene per rotolamento o scivolamento. I calcoli vengono eseguiti sulla base delle equazioni proposte da Piteau e Clayton (1977) e da Bassato et al. (1985).

a. **Masso in caduta libera e traiettoria da saltellamento**

Questo tipo di moto è dominante in pendii con inclinazione superiore ai 45° (Ritchie, 1963).

Il masso inizialmente si muove senza mantenere il contatto con il pendio. La velocità finale di caduta del masso, cioè quella posseduta immediatamente prima dell'impatto con il terreno, secondo le equazioni della meccanica, è data da:

$$(2) \quad V = \sqrt{2 \times g \times d};$$

con

$$(3) \quad g = 9.807 \text{ m/s}^2, \text{ accelerazione di gravità};$$

$$(4) \quad d = \text{distanza percorsa in aria dal masso.}$$

In seguito all'urto con il terreno il blocco viene proiettato in avanti con una velocità data da:

$$(5) \quad V = \sqrt{(V_i \times \sin\beta)^2 \times E + (V_i \times \cos\beta)^2 \times (E \times 0.3^{\log E})};$$

$$(6)$$

con

V_i = velocità d'impatto;

β = angolo d'incidenza della traiettoria del masso rispetto al versante;

E = coefficiente di restituzione dell'energia.

Per quanto riguarda la determinazione dell'angolo di proiezione del blocco nel rimbalzo dopo l'impatto (angolo θ), l'esperienza dimostra che non è da ritenersi valida l'assunzione, spesso usata nelle simulazioni numeriche, che sia uguale all'angolo d'incidenza. Nella simulazione in pratica si può procedere in due modi differenti: si può considerarlo come un parametro variabile in maniera del tutto casuale o porlo in funzione di altre grandezze, in particolare del coefficiente di restituzione E . Le esperienze condotte da vari Autori evidenziano per l'angolo θ valori compresi fra l'orizzontale e la superficie topografica qualunque sia l'angolo d'incidenza (Paronuzzi, 1989). Tali valori possono essere considerati in pratica distribuiti in maniera casuale, in quanto influenzati spesso dalla presenza di piccole asperità od ostacoli nel terreno. In alternativa spesso viene utilizzata una correlazione con il coefficiente di restituzione E :

$$(7) \quad \text{tg } \theta = E \times \text{tg } \beta;$$

dove β è l'angolo d'incidenza del masso.

Data però l'approssimazione con cui è nota la grandezza E , tale approccio andrebbe utilizzato solo nell'ambito di una procedura d'analisi di tipo probabilistico (per es. con il metodo di Montecarlo).

b. **Masso in rotolamento o scivolamento**

Questo tipo di moto è dominante in pendii con inclinazione inferiore ai 45° (Ritchie, 1963).

Il blocco, nel caso di rotolamento, si muove con un moto di rototraslazione lungo il pendio, attraverso una serie di piccoli rimbalzi o, nel caso di scivolamento, con un moto di traslazione pura, mantenendo il contatto con la superficie del pendio lungo una faccia, generalmente la più estesa arealmente.

La velocità finale del masso al termine del tratto di pendio considerato può essere valutata attraverso la relazione:

$$(5) \quad V = \sqrt{V_i^2 + (10/7) \times g \times s \times (\text{tg } \alpha - \text{tg } \phi)}$$

nel caso di moto per rotolamento, o con la formula:

$$(6) \quad V = \sqrt{V_i^2 + 2 \times g \times s \times (\text{sen } \alpha - \text{tg } \phi \times \text{cos } \alpha)}$$

nel caso di moto per scivolamento, con

V_i = velocità iniziale lungo il tratto di pendio considerato;

- s = distanza percorsa dal masso lungo il tratto;
- α = inclinazione del pendio;
- ϕ = angolo d'attrito terra-masso.

Il passaggio da un moto di rotolamento ad uno di scivolamento, nel caso di un masso approssimato da un ellissoide triassiale, avviene quando è verificata la relazione:

$$(7) E < \Delta H \times g \times m;$$

dove:

- ΔH = differenza fra il semiasse maggiore a e quello minore c ($a-c$);
- g = accelerazione di gravità;
- m = massa del blocco;
- E = $E = 0,5 \times m \times V^2 + 0,5 \times I \times \omega^2$, energia totale posseduta dal masso;
- V = velocità del blocco;
- I = momento d'inerzia del blocco, uguale a $(2/5)mR$ per un masso sferico;
- ω = velocità angolare del blocco (velocità di rotazione del masso).

Nel caso di un blocco sferico $\Delta H = 0$, per cui il moto avverrà in pratica solo per rotolamento.

Analisi con metodi probabilistici - Metodo di Montecarlo.

L'incertezza insita nella scelta delle grandezze da introdurre nella simulazione di caduta massi, ed in particolare nei parametri E (coef. di restituzione), ϕ (angolo d'attrito massoversante), e V (volume del masso in caduta). consiglia un approccio di tipo probabilistico al problema.

Il metodo probabilistico generalmente utilizzato è quello di Montecarlo.

Il metodo di Montecarlo si basa sulla generazione di numeri casuali, scelti in determinati intervalli, che godano nel complesso di proprietà statistiche. Fra le varie applicazioni possibili di tali metodi, vi è quella detta 'del campionamento' che consiste nel dedurre proprietà generali di un insieme grande, studiandone solo un sottoinsieme casuale, giudicato rappresentativo dell'insieme stesso. E' evidente che maggiori saranno le dimensioni del campione random, più rappresentative potranno essere considerate le proprietà dedotte.

Nel caso di applicazione del metodo alla simulazione di caduta massi, la procedura da seguire è la seguente:

- si genera la distribuzione delle variabili aleatorie E (coef. di restituzione), ϕ e V misurate in situ o stimate, supponendo che sia di tipo gaussiano (cioè rappresentate da una curva a campana, con il valore centrale corrispondente al valore medio);
- attraverso un generatore di numeri casuali, si crea una serie, estesa quanto si vuole, di valori numerici compresi fra 0 e 1;
- si associa ad ogni valore numerico casuale della serie un valore di E , ϕ e V , rispettando la curva di distribuzione delle probabilità di queste grandezze (facendo cioè in modo che la frequenza con cui un certo parametro viene chiamato nel calcolo sia uguale alla sua probabilità ricavata dalla curva gaussiana di probabilità del parametro stesso); in

questo modo si trasforma la serie di numeri casuali generati nel punto precedente in una serie di coppie di valori di E , ϕ e V ;

- si esegue la simulazione per ogni terna di valori E , ϕ e V .

L'andamento delle traiettorie di caduta collegata ad ogni terna di E , ϕ e V consente di valutare l'influenza della dispersione dei valori di questi parametri sui percorsi di caduta. Normalmente per ottenere distribuzioni stabili delle traiettorie sono necessarie alcune centinaia di verifiche.

Dimensionamento delle opere di difesa

Valutata attraverso la simulazione numerica la distribuzione delle traiettorie dei massi in caduta lungo il pendio, può essere effettuato un primo dimensionamento delle opere di difesa. Queste opere devono essere in grado di intercettare i blocchi rocciosi in caduta e di resistere alle sollecitazioni prodotte dagli impatti. Vanno effettuate quindi due tipi di verifiche:

1. Verifica al superamento per proiezione

Si ripete la simulazione numerica della caduta massi, facendo variare la posizione e l'altezza delle opere di difesa. Si valuta quindi di volta in volta come varia la distribuzione degli arrivi dei massi a valle e la possibilità, attraverso l'esame delle traiettorie, che i blocchi scavalchino le singole opere.

Alla fine andrà ovviamente adottata quella combinazione di opere che permettano di raggiungere la massima efficienza nell'intercettazione dei massi.

2. Verifica al superamento per sfondamento

L'opera di difesa deve essere in grado di resistere all'impatto e di dissipare l'energia cinetica posseduta dal masso, data da:

$$(8) E_c = (1/2) \times m \times V^2 + (1/2) \times I \times \omega^2;$$

con m = peso del masso;

g = accelerazione di gravità;

V = velocità di traslazione del baricentro del masso;

I = momento d'inerzia del blocco; ω = velocità angolare del blocco.

Dalla (8) si nota che l'energia cinetica totale posseduta dal masso è data dalla somma di una componente dovuta al moto di traslazione del baricentro del blocco ($0,5 \times m \times V^2$) ed una legata al moto di rotazione del masso intorno al baricentro stesso ($0,5 \times I \times \omega^2$). Normalmente la seconda componente viene trascurata per la difficoltà di stimare il valore della velocità angolare.

Vengono qui prese in considerazione tre tipi di opere di difesa: le barriere paramassi rigide elastiche ed i terrapieni paramassi. Vengono invece trascurate tutte le opere di difesa attiva (reti addossate, ecc...), che non necessitano di simulazioni numeriche delle traiettorie di caduta.

Barriere paramassi rigide ed elastiche

Si tratta di reti in fune d'acciaio sostenute da puntoni ancorati nel terreno, poste in opera in un numero dispari di campate. L'energia dell'impatto viene dissipata dalla deformazione delle funi della rete ed eventualmente, nel caso delle paramassi flessibili, anche dai dissipatori di energia.

Vengono generalmente fatte due ipotesi sulle condizioni d'impatto.

1) L'urto viene assorbito dalla rete.

Nella maggioranza dei casi il masso colpisce la rete, che dissipa l'energia cinetica dell'impatto trasformandola in calore attraverso la deformazione delle funi d'acciaio. La quantità di energia dissipata è calcolabile attraverso la relazione:

$$(9) E_d(\text{kgcm}) = [(1/2) \times M \times A_f \times A_l^2 / L] \times N_f;$$

con

M = modulo elastico delle funi, generalmente intorno ai 220.000 kg/cmq;

$A_f(\text{cm}^2) = \pi \times D_f^2$, area trasversale delle funi

$D_f(\text{cm})$ = diametro delle funi;

$A_l(\text{cm}) = (a_p/100) \times L$, allungamento massimo delle funi;

a_p = allungamento percentuale della fune, di solito l'8%;

$L(\text{cm})$ = lunghezza totale della singola fune;

N_f = numero di funi coinvolte nell'impatto.

Per la stima di quest'ultimo parametro occorre tener presente l'interasse delle funi e confrontarlo con le dimensioni del masso atteso.

Nelle barriere elastiche, nel caso in cui l'energia dissipabile dalla rete sia minore di quella prevista per l'impatto più violento ($E_d < E_{cmax}$), entreranno in funzione i dissipatori di energia. Un dissipatore consiste in un cappio di fune d'acciaio chiuso da un blocchetto di frizione. In seguito all'urto del blocco di roccia contro la rete, il cappio tende a scorrere all'interno del blocchetto di frizione, dissipando per attrito una frazione dell'energia cinetica del masso impattante.

L'energia dispersa dai dissipatori è data da:

$$(10) E_f(\text{kgcm}) = (E_{cmax} - E_d) / (L_c \times N_f);$$

con

- $E_{cmax} - E_d$ = frazione di energia cinetica non dissipata dalla deformazione della rete;
- L_c = lunghezza del cappio, generalmente 90 cm;
- N_f = numero di dissipatori che entrano in funzione.

La pressione di serraggio dei blocchetti di frizione è data invece da:

$$(11) P_s(\text{kg/cmq}) = E_f / (C_a \times S_c);$$

con

- $C_a(\text{cm})$ = coefficiente d'attrito acciaio-acciaio, generalmente uguale a 0.2;
- $S_c(\text{cmq})$ = $[(2/3) \times (\pi \times D_f) - (0.2 \times 0.2)] \times l$, superficie di contatto fune-blocchetto;
- $D_f(\text{cm})$ = diametro della fune;
- $l(\text{cm})$ = lunghezza del contatto fune-blocchetto.

2) L'urto viene assorbito dai puntoni.

Nella previsione di un'impatto con uno dei puntoni d'acciaio che sostengono le reti, occorre verificare la quantità di energia dissipabile nell'urto e la necessità di eventuali ancoraggi. L'energia cinetica dissipata è data da:

$$(12) E_{dp}(\text{kgcm}) = (1/2) \times F^2 \times [H^3 / (3 \times M_a \times J_a)];$$

con

- $F(\text{kg})$ = $M_{ra} \times S_a / H$, massima forza assorbita dal puntone in fase elastica;
- $M_{ra}(\text{cm}^3)$ = modulo di resistenza dell'acciaio;
- $S_a(\text{kg/cmq})$ = resistenza a trazione dell'acciaio;
- $H(\text{cm})$ = altezza fuori terra del puntone;
- $M_a(\text{kg/cmq})$ = modulo elastico dell'acciaio;
- $J_a(\text{cm}^4)$ = momento d'inerzia dell'acciaio.

La corrispondente massima deformazione elastica dell'acciaio è data da:

$$(13) D_{max}(\text{cm}) = F \times [H^3 / (3 \times M_a \times J_a)];$$

l'energia dissipata dalla deformazione elastica del puntone è sempre molto modesta, se confrontata con le energie massime degli impatti. Spesso, nelle barriere elastiche, si ancorano i puntoni in testa, per permettere l'assorbimento dell'energia eccedente. Supponendo che la deformazione dei puntoni rimanga in fase elastica, l'energia cinetica assorbita dagli ancoraggi sarà data da:

$$(14) E_{da}(\text{kgcm}) = [(1/2) \times M_f \times A_f \times Def^2 / H] \times N_f;$$

con

- $M_f(\text{kg/cmq})$ = modulo elastico della fune;
- $A_f(\text{cmq})$ = $\pi \times (D_f/2)^2$, area trasversale della fune
- $Def(\text{cm})$ = $D_{max} / \cos^2(\tau)$ allungamento della fune relativa alla massima deformazione elastica del puntone;
- τ = angolo fra ancoraggio e puntone;
- N_f = numero degli ancoraggi sollecitati.

Se si prende in considerazione però la massima deformazione che può essere assorbita dalle funi si ottiene:

$$(15) E_{da}(\text{kgcm}) = [(1/2) \times M_f \times A_f \times \text{Defmax}^2/H] \times N_f;$$

con

$\text{Defmax}(\text{cm}) = (\text{Almax} / 100) \times L_c$, allungamento massimo sopportabile dalla fune d'acciaio;

Almax = allungamento percentuale massimo della fune; $L_c(\text{cm})$ = lunghezza totale della fune.

RISULTATI ELABORAZIONE

Il metodo di calcolo ha utilizzato il metodo Montecarlo per la simulazione delle traiettorie

Le ipotesi di simulazione sono:

- blocco iniziale si possa distaccare dalla posizione con $X=34.62$ e punto finale con $X= 8.16$
- angolo massimo di ingresso in scarpata -10°
- velocità di partenza nulla e velocità finale 0.005
- numero verifiche eseguite = 100

Si allegano i risultati sintetici delle curve di elaborazione della simulazione della caduta di un blocco di dimensione puntiforme di 1mc .

I risultati evidenziano che l'energia massima all'impatto con la barriera paramassi è di 500KJ inferiore ai 1100KJ di progetto.

Inoltre evidenziano che solo 1% dei blocchi potrà superare l'altezza della barriera di 3m

Il tecnico

Ing. Luca Corazza