

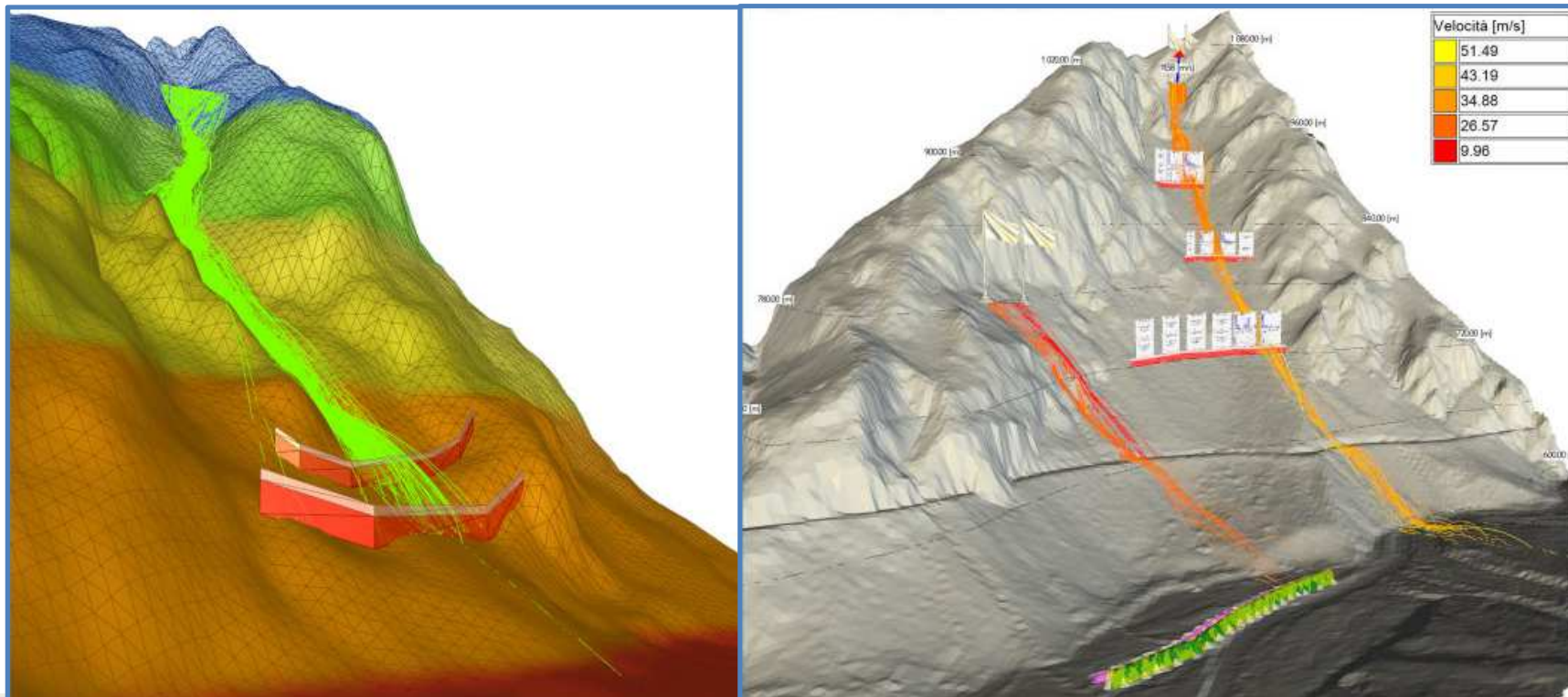


Corso di aggiornamento per ingegneri
12 Crediti Formativi Professionali
San Ponziano, Spoleto, 22-23 settembre 2017
Corso organizzato da APICE srl e prof. Aurelio Gherzi col patrocinio
dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Perugia

CORSO

Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

Ing. Francesco Oliveto: Libero professionista



Spoleto, 23 Settembre 2017

MECCANICA DELLE FRANE E METODOLOGIE DI CONSOLIDAMENTO

INDICE

ore 8.30–10.30/11.00-13.00 :

1. Opere di Sostegno:

Strutture superficiali: (*muri a gravita, a mensola e contrafforti in c.a.*)

Strutture di sostegno speciali: (*Paratie libere e con tiranti, pali discreti, muri su pali e/o con tiranti, pozzi strutturali*)

2. Calcoli di Stabilit : Cenni sui metodi MEL, FEM-FDM.

3. Interazione struttura – Pendio instabile: Meccanismi di trasferimento delle azioni, fattore di sicurezza progetto, calcolo della resistenza degli interventi, scelta dell'ubicazione delle opere, effetto arco, verifiche di stabilit , metodi di calcolo per pali e pozzi strutturali soggetti ad azioni franose, proporzionamento e verifiche geotecniche e strutturali.

4. Pendii in roccia: Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.

4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE**

Nella letteratura scientifica, i crolli al pari delle colate sono classificate come **fenomeni da rapidi ad estremamente rapidi (velocità > 3 m/s)** con **elevata capacità d'espandimento** costituendo dunque una fonte di pericolo per qualsiasi attività umana.

La velocità dei movimenti può infatti essere tale da **rendere inefficace la messa in opera di qualsiasi strumentazione d'allarme**, indirizzando gli studi verso le **misure di prevenzione**.

Il termine "**frane da crollo**" si riferisce al distacco di una massa di dimensione variabile da una parete rocciosa o da un pendio dotato di elevata acclività, dove l'innesco del movimento di caduta è determinato generalmente (vedi fig.1):

1. *Dalla rottura per taglio o trazione lungo piani di discontinuità preesistenti dall'ammasso stabile con spostamento di distacco nullo o trascurabile nelle fasi iniziali ;*
2. *Il movimento è seguito da un moto vario per caduta libera in aria, impatto, rimbalzo, rotolamento o scivolamento, da rapido a estremamente rapido*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE

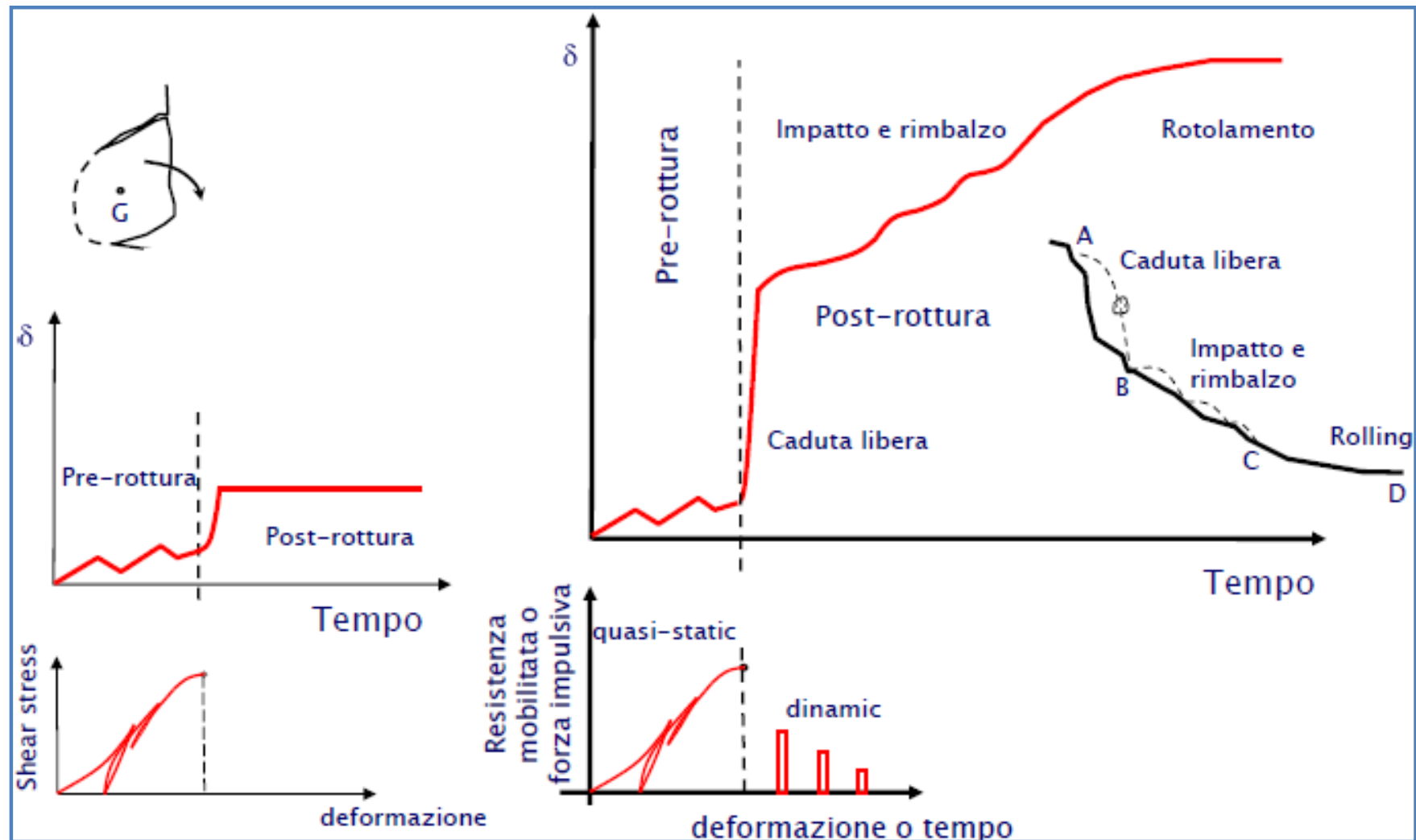


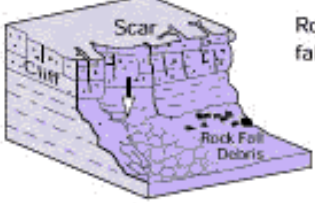
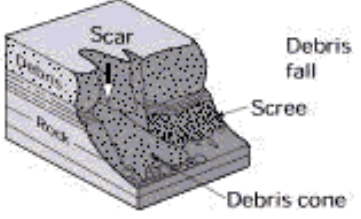
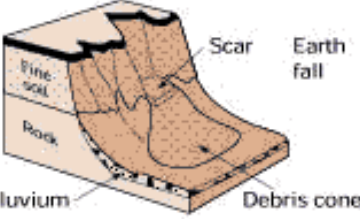
fig 1 : Evoluzione di una frana per crollo (da Cascini et.al)



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **DEFINIZIONE E CLASSIFICAZIONE**

Le frane da crollo in generale si possono classificare: Secondo il materiale costituente la massa originaria instabile in (vedi fig.2) **Crolli di roccia, detrito e terra;**

fig 2 : tipologie di frane da crollo in funzione del tipo di materiale (Varnes,1978)

Material		ROCK	DEBRIS	EARTH
Movement type				
FALLS				
		Rock fall	Debris fall	Earth fall

In funzione del volume di distacco V e l'entità delle interazioni dinamiche durante il moto (Rochet, 1987):

- Crolli di blocchi isolati ($10^{-2} \leq V[m^3] \leq 10^2$), in assenza d'interazioni;
- Crolli di piccole masse ($10^2 \leq V[m^3] \leq 10^3$), con interazioni trascurabili tra i blocchi;
- Crolli di grandi masse ($10^5 \leq V[m^3] \leq 10^7$), con interazioni non trascurabili e crescenti con il volume;
- Grandi movimenti di massa o rock avalanches ($10^7 \leq V[m^3] \leq 10^{11}$), caratterizzate da interazioni sempre più elevate al crescere del volume;



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA**

L'analisi dei fenomeni che avvengono durante i fenomeni di crollo è qui svolta con riferimento al moto di un singolo blocco che si distacca da un ammasso roccioso e perde temporaneamente il contatto con il pendio senza interagire con altri blocchi.

In una frana da crollo si possono individuare due fasi:

1. **Fase di distacco della massa instabile dalla sorgente (ammasso stabile):** La fase di distacco è caratterizzata dai movimenti relativi (traslazioni e rotazioni) tra i blocchi delimitati dalle discontinuità. I movimenti possono essere inizialmente di piccola entità fino a provocare la separazione dei blocchi dall'ammasso in posto;
2. **Fase di moto verso valle fino all'arresto del blocco:** successivamente alla fase di distacco il moto dei blocchi è determinato dal tipo d'instabilità e dalla geomorfologia del pendio. I tipi di moto che avvengono in tale fase possono essere un'alternanza di:
 - *Caduta libera;*
 - *Impatto (con possibile rottura del blocco);*
 - *Rimbalzo;*
 - *Rotolamento e scivolamento;*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA**

FASE DI DISTACCO : Cause predisponenti

I fenomeni di crollo di blocchi rocciosi sono classificati convenzionalmente in:

1. **Crolli primari** (*distacco del blocco direttamente dall'ammasso roccioso in posto*);
2. **Crolli secondari** (*rimobilizzazione di blocchi fermi sul pendio a seguito d'impatti di blocchi sovrastanti oppure da sollecitazioni sismiche*);

Generalmente i crolli si generano senza evidenti indizi premonitori. In ogni caso come per le altre tipologie di frane è possibile individuare delle cause predisponenti e innescanti. Tra le cause predisponenti abbiamo:

- *La morfologia del versante;*
- *La struttura dell'ammasso roccioso che deve essere caratterizzata dalla presenza di discontinuità principali e secondarie la cui intersezione può isolare blocchi di roccia di varie dimensioni.*

La condizione d'instabilità si genera quando lungo i probabili piani di movimento si ha la rottura per taglio o trazione.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA**

FASE DI DISTACCO : Cause innescanti

Le cause che possono provocare la rottura (vedi fig .3) possono essere riassunte in:

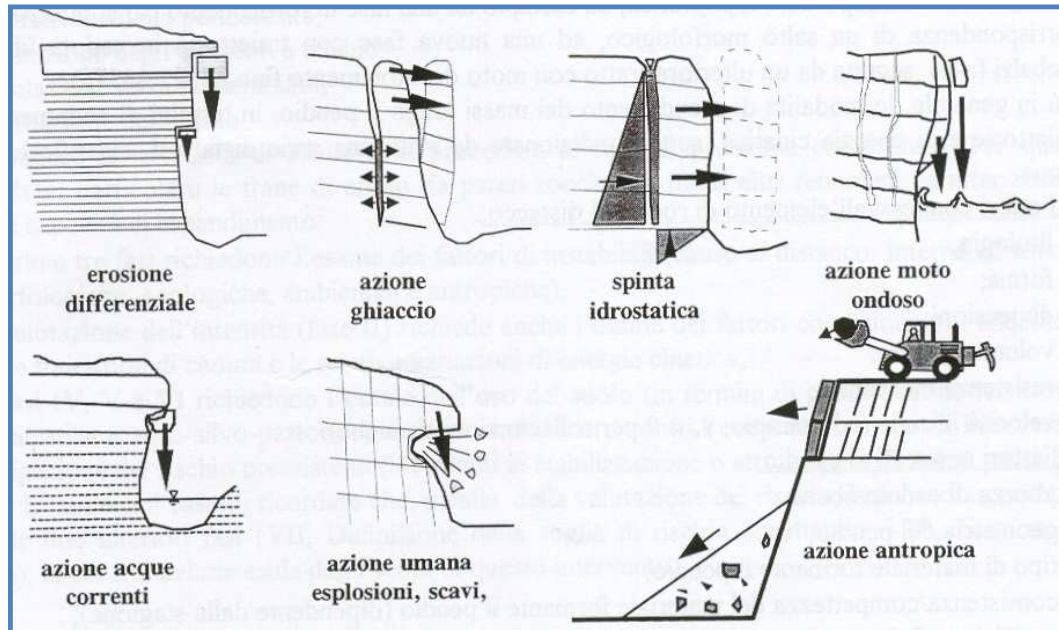


fig 3 : rappresentazione di alcune delle cause che portano al crollo di blocchi da pareti rocciose [da Cancelli et al., 1999]

1. *Erosione differenziale con formazioni di blocchi aggettanti;*
2. *Spinta derivante dalla formazione del ghiaccio nelle fratture;*
3. *Spinta dell'acqua nelle fratture;*
4. *Azione umana (escavazioni, etc.);*
5. *Sollecitazioni dinamiche agenti sul pendio (uso d'esplosivi, azioni sismiche, etc.);*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA** **FASE DI DISTACCO :** *Analisi di stabilità*

- *La fase di distacco dei blocchi può essere analizzata con i consueti metodi della stabilità dei pendii in roccia.*
- *Il problema che si presenta di solito è lo studio della stabilità del singolo blocco o di un sistema di blocchi soggetti ad un sistema di forze esterne quali la gravità, spinte idrauliche, azioni dinamiche, sovraccarichi etc.*
- *L'analisi di stabilità può essere di tipo statico e dinamico. Nel caso d'analisi statica si fa riferimento ai classici metodi dell'equilibrio limite, note, infatti, la geometria del problema, le caratteristiche di resistenza al taglio dei piani di discontinuità interessati e l'entità delle forze agenti, si valuta se queste ultime sono sufficienti a violare il criterio di rottura e a mobilitare i blocchi.*
- *I metodi statici considerano i blocchi rigidi con solo moto di traslazione e di rotazione. Un'analisi di questo tipo può essere effettuata con la teoria dei blocchi (Goodman e Shi,1985) il cui scopo è l'identificazione di blocchi di roccia critici che, in mancanza di adeguato contrasto, liberano altri blocchi e portano al collasso dell'intero ammasso roccioso.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA** **FASE DI DISTACCO** : Condizioni iniziali del moto

Successivamente al distacco del blocco, il moto dei blocchi è determinato dal tipo d'instabilità che si genera e dalla morfologia del pendio.

1. *Nel caso di parete verticale aggettante, i blocchi possono cadere liberamente nel vuoto ed accelerare sotto l'azione della gravità, e se soggetti a forze esterne (sisma), iniziare la caduta con velocità iniziale non nulla.*
2. *Nel caso di scorrimento traslazionale (planare o a cuneo), essi possono traslare con una velocità che è funzione della gravità, d'altre forze esterne, della geometria del piano di scorrimento e dell'attrito piano blocco. Questo tipo di moto avviene finché la geometria del pendio non innesca una nuova fase di caduta libera.*

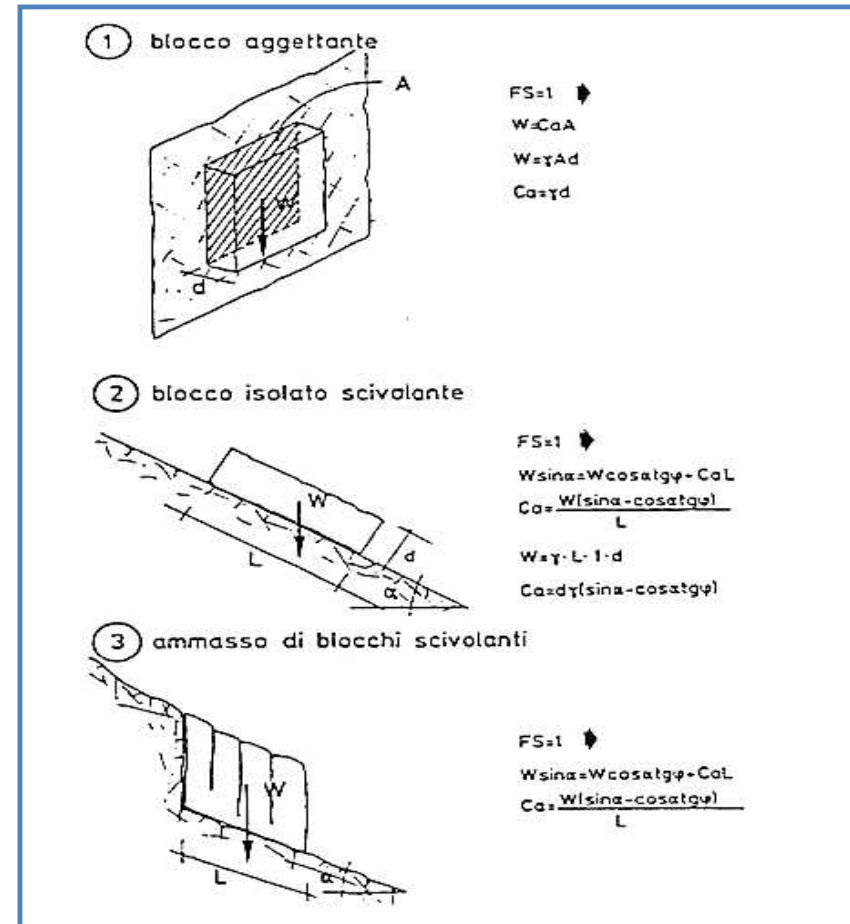


Fig 4: rappresentazione delle situazioni di distacco dei blocchi, da cui dipende il moto successivo [da Barla , 1999]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA**

FASE DI DISTACCO : Condizioni iniziali del moto-Carte di stabilità , Sagaseta (1986)

Esistono inoltre in letteratura per lo studio della fase di distacco semplici carte di stabilità (vedi fig 5 e 6) che permettono per blocchi di forma assegnata (approssimata a parallelepipedo) di studiare la stabilità del blocco oppure riconoscere un'instabilità per scivolamento, ribaltamento e scivolamento - ribaltamento.

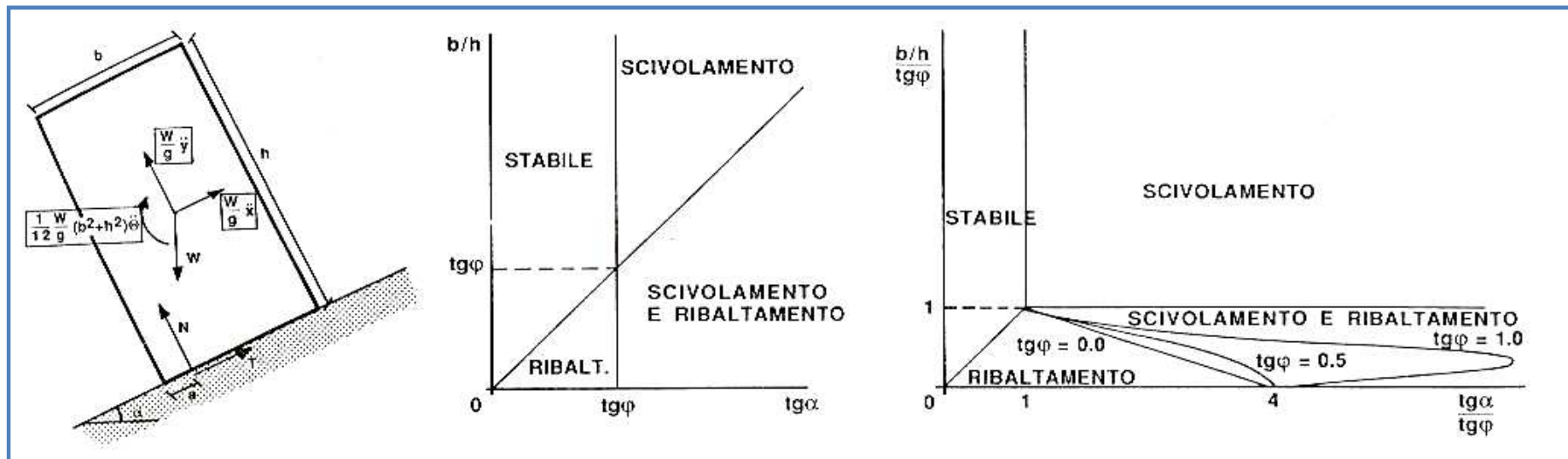


Fig 5: Carta di stabilità da Sagaseta (1986)



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DI PRE-ROTTURA**

FASE DI DISTACCO : Condizioni iniziali del moto-Carte di stabilità Martinetti e Ribacchi (1976)

La presenza d'acqua nei giunti che separano il blocco potenzialmente instabile dalla roccia madre, modifica sicuramente i campi di stabilità e del moto peggiorandone la situazione.

Il problema è stato risolto da Martinetti e Ribacchi che ha incluso nell'analisi del moto le spinte dell'acqua sulla base delle seguenti ipotesi riportate in fig.6:

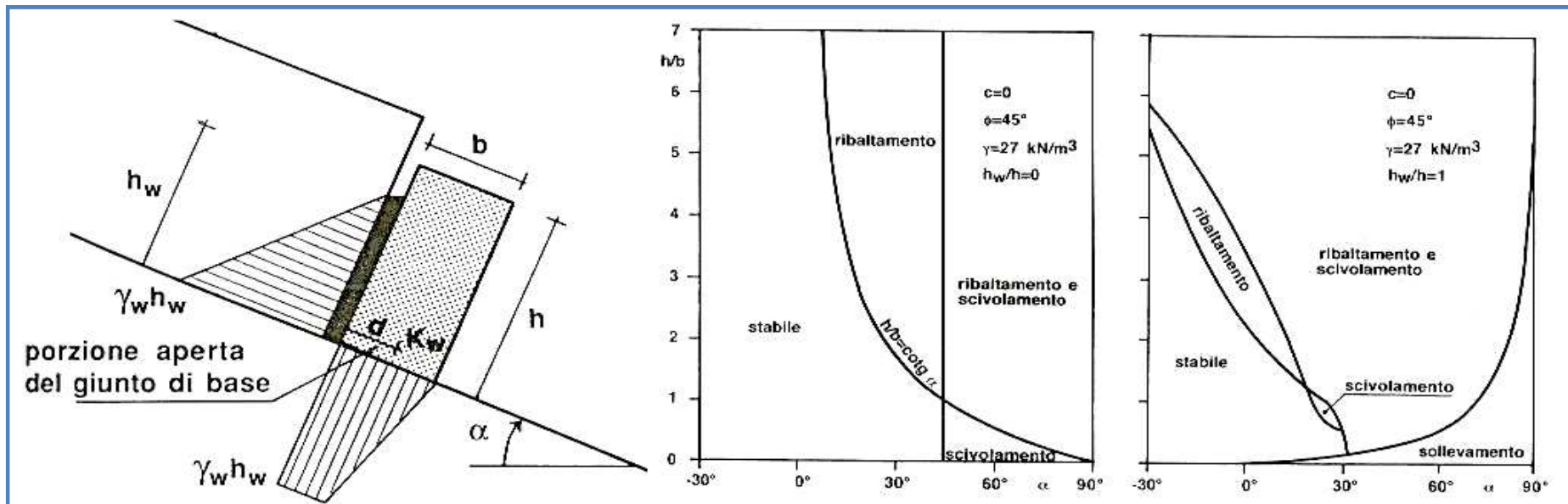


Fig 6: Carta di stabilità in presenza di acqua nei giunti. [da Martinetti e Ribacchi, 1976]



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Modalità e fattori che influenzano lo scendimento dei blocchi

Dopo il distacco iniziale, il movimento lungo il versante procede secondi cinematismi diversi, comprendenti:

- *Caduta libera in aria e primo impatto principale con elevata dissipazione d'energia ed eventuale frammentazione del blocco (con riduzione di dimensioni e proiezione di schegge);*
- *Uno o più rimbalzi successivi (in genere, ma non sempre con progressiva riduzione d'altezze e gittate delle parabole);*
- *Rotolamento definito con criterio convenzionale, con progressiva riduzione dell'energia cinetica (o della velocità), fino al punto d'arresto del blocco;*

La sequenza dei vari cinematismi può variare in funzione delle variazioni della topografia del pendio, ma più in generale le modalità di scendimento dei massi lungo il pendio, in termini di traiettorie ed energia cinetica, sono condizionati da una serie di fattori quali:



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Modalità e fattori che influenzano lo scendimento dei blocchi

Fattori connessi all'elemento roccia di distacco:

- *Litologia, forma, dimensioni, resistenza meccanica del blocco in caduta;*
- *Velocità iniziale del blocco (nel caso d'accelerazioni sismiche, esplosioni etc);*

Fattori connessi al pendio:

- *Altezza di caduta libera;*
- *Geometria del pendio;*
- *Tipologia del materiale che costituisce il pendio;*
- *Consistenza/compattezza del materiale che costituisce il pendio;*
- *Coefficienti di restituzione normale e tangenziale;*
- *Presenza e tipo di vegetazione;*
- *Irregolarità minori lungo il pendio;*
- *Presenza d'opere antropiche;*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Caduta libera

La fase di caduta libera (fig. 7a) è caratterizzata dal fatto che il movimento del blocco avviene in aria, quindi non a contatto con il pendio. Può avere inizio a seguito *dell'impatto del masso con il pendio* (fig.7b), oppure a seguito di una *fase di rotolamento e scivolamento per una brusca variazione della superficie topografica* (fig.7a).

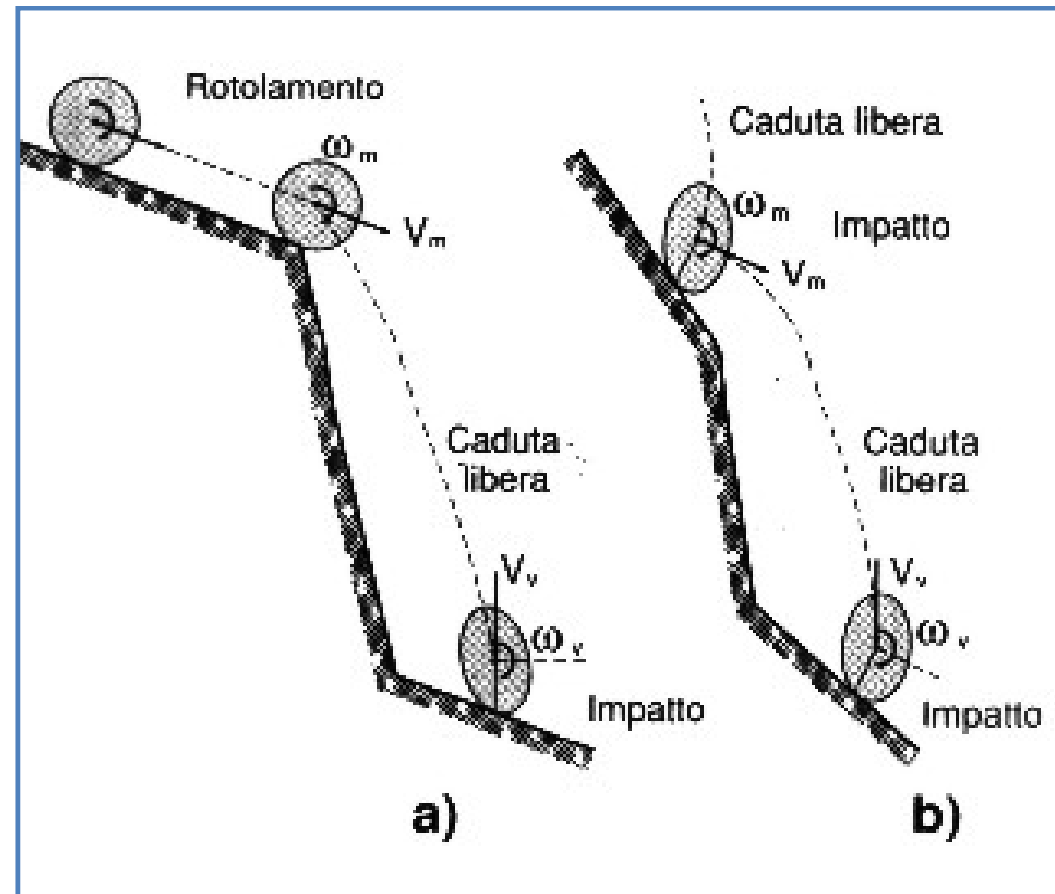


Fig 7: Possibili condizioni iniziali della fase di caduta libera



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Caduta libera

In questa fase sono trascurate le forze dovute alla resistenza all'aria e al sollevamento aereodinamico. Il moto può essere suddiviso in due contributi:

- *un moto di traslazione del baricentro del blocco ;*
- *un moto di rotazione del blocco attorno al centro di massa ;*

In ogni caso per conoscere il moto, bisogna conoscere le condizioni (velocità traslazionale e rotazionale) che si hanno nel punto all'origine di distacco. Il moto di caduta libera può essere studiato con l'ausilio delle equazioni cardinali della meccanica dei corpi rigidi (riferiti al baricentro del blocco), che con le ipotesi fatte diventano:

$$\begin{cases} \vec{R}^e = m \cdot \vec{a}_G \\ \vec{M}_G^e = \dot{\vec{K}}_G = \vec{0} \end{cases}$$

dove:

- *La prima equazione consente di determinare il moto del centro di massa del blocco, che è un arco di parabola (trascurando la resistenza all'aria);*
- *La seconda equazione definisce il moto rotatorio attorno al centro di massa.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Determinazione del punto d'intersezione blocco - pendio:

Il punto di intersezione blocco - pendio può essere calcolato in modi diversi a secondo delle caratteristiche con cui si schematizza il corpo nella fase d'impatto.

Blocco puntiforme (lumped mass): *in questo caso il punto d'impatto si determina facendo intersezione tra l'equazione della parabola di caduta del baricentro del blocco, con la spezzata che definisce il profilo del pendio (fig .8)*

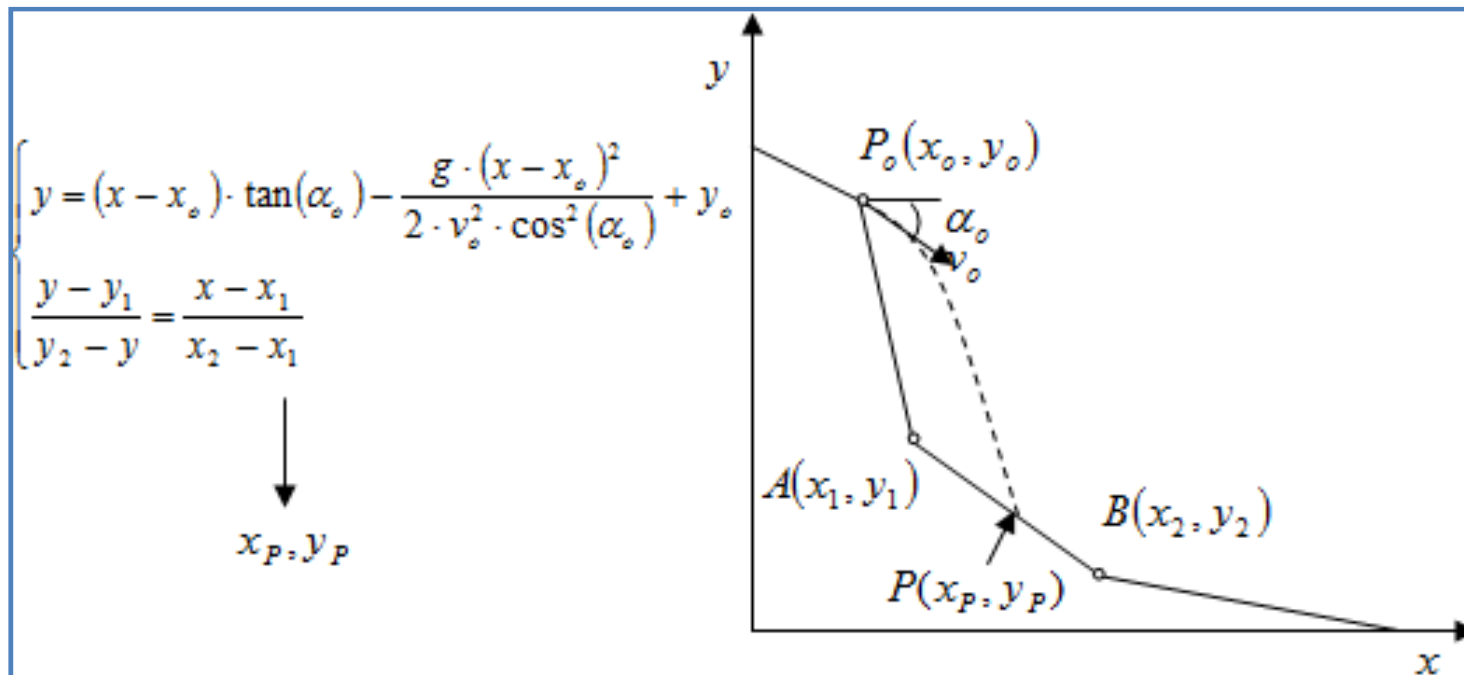


Fig.8: determinazione del punto d'impatto nel caso di modelli Lumped-Mass e modelli ibridi



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Determinazione del punto d'intersezione blocco - pendio:

Nel caso in cui il blocco è considerato con la forma (sferica, ellittica), il punto d'impatto è determinato o come tangenza del blocco con il piano che definisce il pendio (fig.9a), oppure come appartenente ad uno spigolo della spezzata che definisce il pendio (fig .9b).

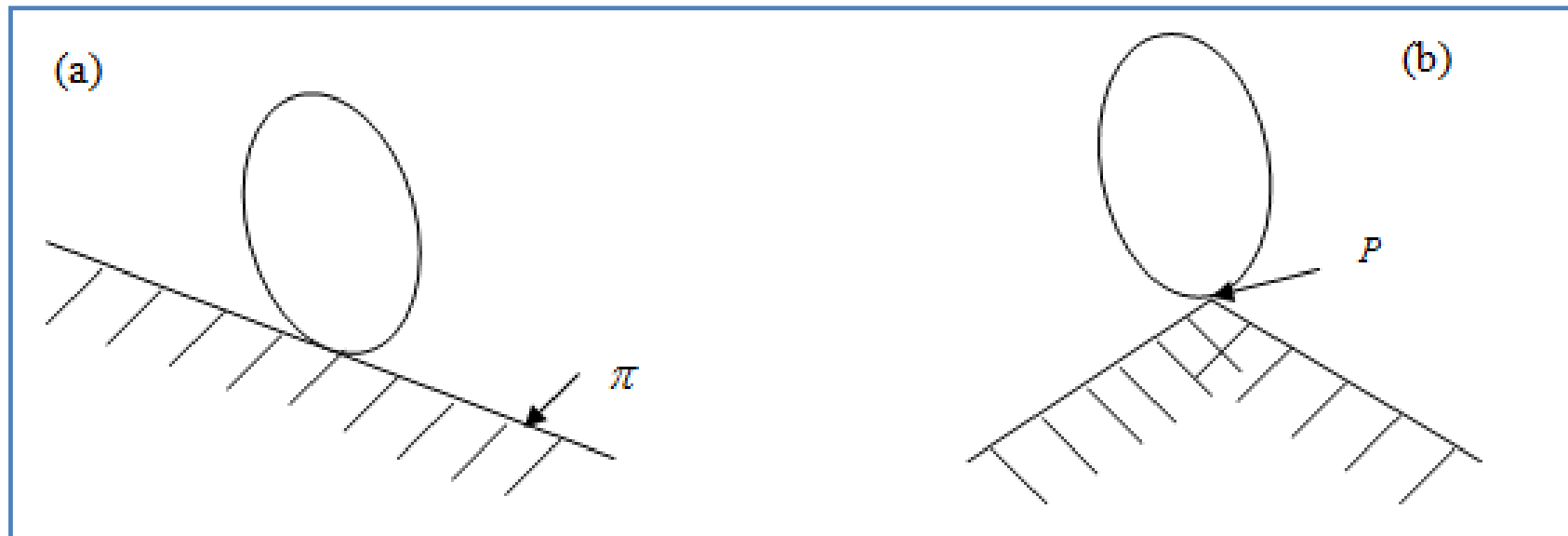


Fig 9: determinazione del punto d'impatto nel caso di blocchi a forma ellittica o sferica nelle due condizioni d'impatto:
(a) impatto con il tratto di pendio; (b) impatto contro l'apice del pendio

Nel caso di blocchi di qualsiasi forma (poligonali) il punto d'impatto è determinato come condizione d'appartenenza di uno dei vertici del blocco con il pendio (o suoi spigoli);



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Impatto e rimbalzo

L'urto di un blocco solido su una superficie d'impatto è un fenomeno dinamico il cui studio completo richiede la conoscenza oltre delle forze esterne anche di quelle interne che si scambiano i corpi in collisione. Poiché nei processi d'urto sono preponderanti rispetto a quelle esterne (gravità, attrito etc.), ai fini ingegneristici è possibile studiare il fenomeno d'urto con riferimento ai principi di conservazione della quantità di moto, del momento della quantità di moto e dell'energia totale.

Gli urti sono classificati in elastici e anelastici a seconda o meno che si conservi l'energia cinetica del blocco, mentre nel caso in cui il blocco rimanga conficcato nel terreno allora l'urto è completamente anelastico. **Il fenomeno d'impatto blocco - terreno può essere studiato utilizzando la meccanica del corpo rigido e la teoria degli urti, inoltre conviene suddividere gli impatti in:**



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Impatto e rimbalzo

- ***Impatti normali ed obliqui*** in cui la velocità relativa è, rispettivamente parallela o inclinata rispetto alla normale all'urto;
- ***Impatti centrali ed eccentrici***, quando il centro di massa giace o non giace sulla normale d'urto;
- ***Contatto puntiforme spigolo - superficie***: la superficie d'impatto è estremamente limitata e può essere considerata puntiforme;
- ***Contatto spigolo - superficie***: il contatto avviene in corrispondenza dello spigolo del blocco;
- ***Contatto faccia - superficie***: il contatto avviene lungo una delle facce del blocco;
- ***Urto completamente anelastico***: il corpo impatta il terreno e vi penetra per una profondità (z) fino ad esaurire l'energia cinetica iniziale. Blocco e terreno aderiscono durante tutta la durata dell'impatto e le deformazioni del terreno sono esclusivamente plastiche;
- ***Urto parzialmente anelastico***: il terreno in conseguenza dell'impatto subisce delle deformazioni elastoplastiche. La parte elastica è restituita dopo l'urto e blocco e terreno assumono velocità diverse dopo l'impatto.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* FASE DEL MOTO VERSO VALLE

FASE DI MOTO: Impatto e rimbalzo

La forza d'impatto F_i (fig.10) è una forza impulsiva, la cui intensità dipende dalla rigidezza relativa tra blocco e pendio, inoltre è variabile nel tempo e produce una variazione discontinua della velocità. Se il blocco che impatta è molto più rigido della superficie d'impatto (detrito, terreno), allora la dinamica del fenomeno è controllata dalle proprietà geomeccaniche del substrato.

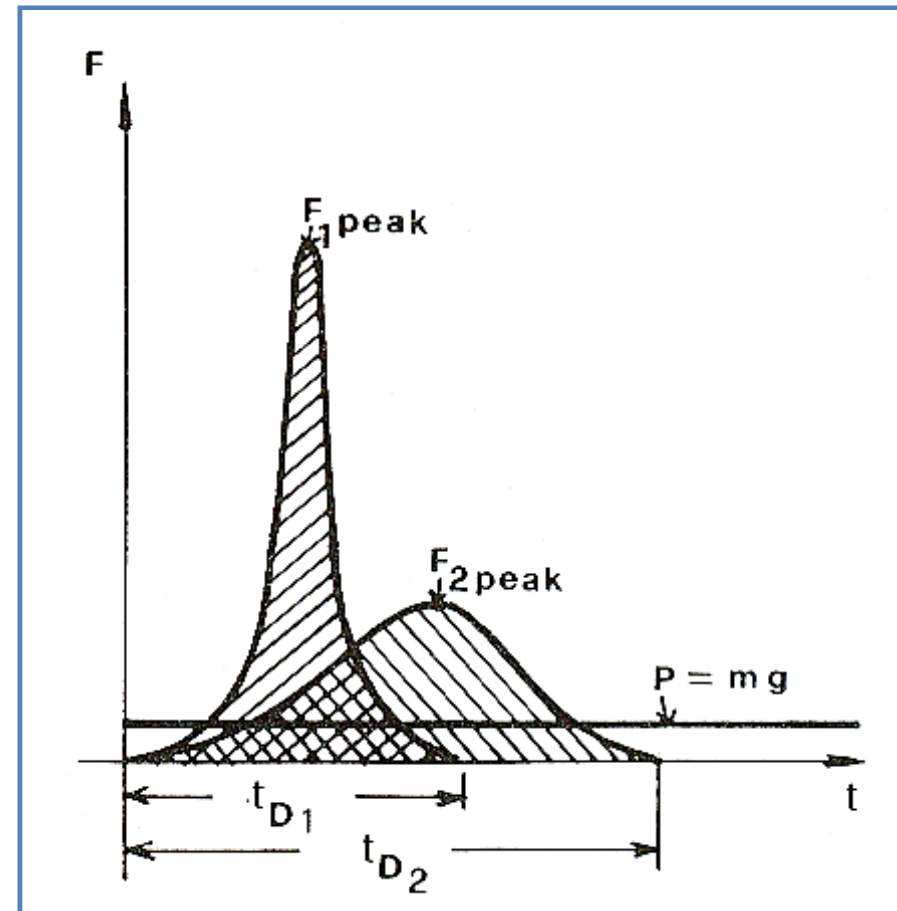


Fig 10: Andamento tipico di forze impulsive durante un impatto di durata t_D



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Impatto e rimbalzo -coefficiente di restituzione

Coefficiente di restituzione : La modellazione del fenomeno di caduta massi implica, per l'indeterminazione di tutte le variabili presenti nel problema e per economia di calcolo una semplificazione della trattazione fisico matematica del problema. Alcuni Autori dei modelli Lumped Mass, hanno proposto che le caratteristiche d'impatto e rimbalzo siano esprimibili con dei semplici parametri, definiti coefficienti di restituzione, che esprimono la dissipazione dell'energia cinetica nell'impatto.

I coefficienti di restituzione possono determinati utilizzando il principio di conservazione della quantità di moto (Spang e Rautenstrauch, 1988) definiti come:

$$k = \frac{v_r}{v_i}$$

Rapporto tra la velocità post-impatto e pre-impatto. Esso varia nell'intervallo (0-1) tra urto completamente anelastico ad elastico.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

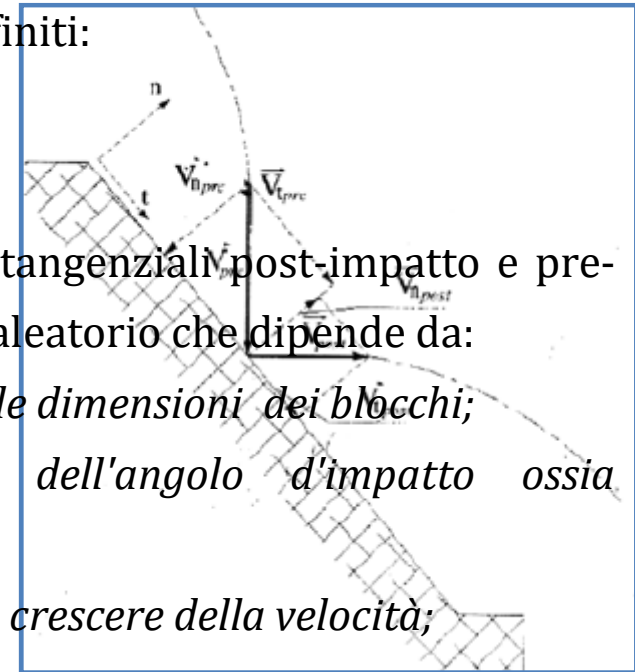
FASE DI MOTO: Impatto e rimbalzo -coefficiente di restituzione

Coefficiente di restituzione : L'evidenza sperimentale ha mostrato che il coefficiente di restituzione deve essere considerato nelle sue componenti normali (k_n) e tangenziali (k_t), piuttosto che come unica aliquota d'abbattimento dell'energia cinetica. In tal caso k_n quantifica l'energia dissipata per affossamento del blocco mentre k_t quantifica quella dissipata per attrito al contatto blocco-pendio. I coefficienti sono così definiti:

$$k_n = \frac{v_{nr}}{v_{ni}} \quad k_t = \frac{v_{tr}}{v_{ti}}$$

Rispettivamente come rapporto tra le componenti normali e tangenziali post-impatto e pre-impatto. In realtà il coefficiente di restituzione è un parametro aleatorio che dipende da:

- *Massa, forma e dimensioni del blocco: decresce al crescere delle dimensioni dei blocchi;*
- *Angolo d'incidenza all'impatto: decresce al crescere dell'angolo d'impatto ossia all'approssimarsi dell'angolo alla normale al pendio;*
- *Dalla velocità d'impatto (traslazione e rotazione): decresce al crescere della velocità;*
- *Dalle proprietà meccaniche del blocco e del pendio.*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Impatto e rimbalzo -coefficiente di restituzione

Coefficiente di restituzione : Altri Autori di modelli ibridi (Bozzolo e Pamini, 1982, Azzoni, 1991, et al.) studiano invece il fenomeno d'impatto con riferimento al coefficiente di restituzione dell'energia così definito :

$$k = \frac{E_r}{E_i}$$

Questa definizione è equivalente a quella di prima, nel caso di blocco puntiforme ma non di blocco con forma poiché si tiene conto della parte d'energia cinetica legata al moto rotatorio.

Infine altri studiano il fenomeno d'impatto (Falcetta, 1985, et al.) con riferimento all'interazione corpo rigido pendio compressibile analizzando lo stato di deformazione nel pendio ipotizzando legami costitutivi diversi secondo il tipo di materiale del pendio (substrato).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Rimbalzo

Il Rimbalzo: Il moto di rimbalzo è un moto che può instaurarsi dopo l'impatto. Il fenomeno di rimbalzo viene descritto con riferimento alle equazioni della caduta libera una volta noti velocità di rimbalzo (del baricentro e angolare) ed angolo di rimbalzo.

Osserviamo inoltre che l'angolo di rimbalzo definito sulla base dei coefficienti di restituzione può variare per effetto della rugosità del pendio. Nella fig.11 viene illustrata l'influenza dei coefficienti di restituzione sui percorsi dei blocchi.

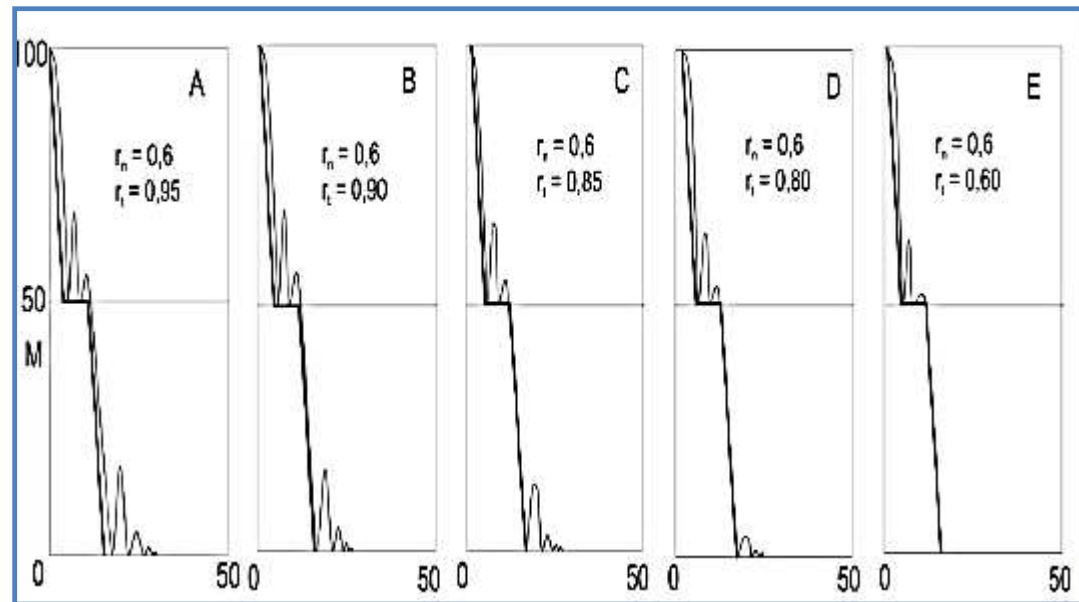


Fig.11: traiettorie del blocco al variare dei coefficienti di restituzione [da Richards, 1988]



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Rotolamento e scivolamento

Il Rotolamento: Il moto di un blocco a seguito di un impatto può essere di diverso tipo: arresto del blocco nel punto d'impatto, rimbalzo, rotolamento e scivolamento. Da un punto di vista energetico che può instaurarsi un moto di rotolamento (fig.12), la dissipazione dell'energia cinetica per unità di percorso dipende dalla rugosità del pendio e dalla geometria del blocco. La dissipazione energetica per unità di percorso può essere posta pari ad un coefficiente d'attrito al rotolamento equivalente. I valori misurati da prove in sito tendono a crescere con la rugosità del pendio e l'irregolarità del blocco (aumentano il numero di collisioni tra blocco e pendio). Il valore limite inferiore si ha per superficie piana e un blocco di forma sferica.

Nel caso di blocchi di roccia teneri, l'effetto delle collisioni multiple, tende a smussare gli spigoli con aumento del coefficiente d'attrito al rotolamento. Ciò porta a concludere che il moto di rotolamento nel caso di caduta blocchi su pendii reali non è un moto di puro rotolamento ma è un moto di rotazioni aeree e collisioni multiple.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* FASE DEL MOTO VERSO VALLE

FASE DI MOTO: Rotolamento e scivolamento

Il Rotolamento: Nella necessità di schematizzare il fenomeno fortemente aleatorio, si semplifica il moto facendo riferimento a blocchi di forma a sezione circolare (cilindro, sfera e disco) che rotolano sul pendio (piano) in presenza di attrito al rotolamento o volvente. Tale semplificazione per ciò che abbiamo detto in precedenza è cautelativa (vedi fig.12).

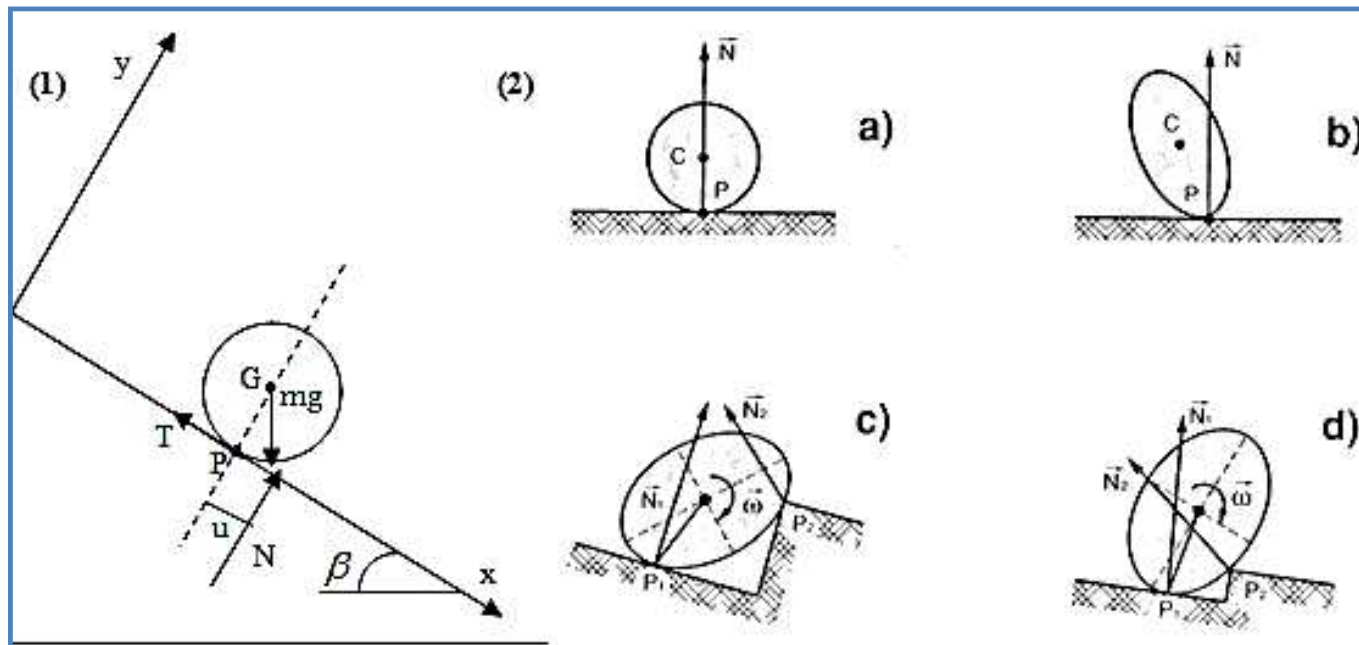


Fig.12:(1) definizione delle variabili utilizzate nel moto di rotolamento.

(2) influenza della geometria del blocco e della superficie del pendio sulle caratteristiche del moto



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Rotolamento e scivolamento

Il Rotolamento: Nella necessità di schematizzare il fenomeno fortemente aleatorio, si semplifica il moto facendo riferimento a blocchi di forma a sezione circolare (cilindro, sfera e disco) che rotolano sul pendio (piano) in presenza di attrito al rotolamento o volvente. Tale semplificazione per ciò che abbiamo detto in precedenza è cautelativa.

Il significato fisico dell'attrito al rotolamento è legato al momento antagonista che si crea al vincolo di contatto tra blocco e superficie. Nel caso di contatto blocco - superficie entrambi i materiali si deformano, poiché il comportamento dei materiali non è lineare, la reazione normale al vincolo avrà una retta d'azione che non passa per il punto di contatto ma un'eccentricità rispetto al baricentro del blocco (misura del coefficiente d'attrito al rotolamento), ciò causa la nascita di un momento antagonista che si oppone al movimento del blocco.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Rotolamento e scivolamento

Il Rotolamento: Per un blocco reale (irregolare) e un pendio naturale (rugoso) il fenomeno è più complicato. Momenti antagonisti nascono oltre alla non linearità del comportamento meccanico dei materiali, sia per le irregolarità della forma del masso che della superficie di rotolamento. Studiando il fenomeno in questa maniera si ha la necessità di inglobare nel coefficiente d'attrito al rotolamento una serie di fenomeni complessi. Espressioni del coefficiente d'attrito al rotolamento sono state proposte da Statham (1979) e Azzoni (1995) che con riferimento a prove condotte su pendii detritici:

$$\tan \delta_{rol} = \tan \delta_o + K \cdot \left(\frac{d}{D} \right)$$

Dove δ_o è il coefficiente d'attrito al rotolamento per superficie piana, e $d-D$ sono rispettivamente la dimensione media della granulometria costituente il terreno e il diametro del blocco, è K un coefficiente ricavato sperimentalmente.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Rotolamento e scivolamento

Il Rotolamento: L'affidabilità di tale relazione è stata verificata da Bozzolo e Pamini (1986), che hanno proposto i seguenti valori per i parametri:

$$\begin{cases} \tan \delta_o = 0.37 - 0.67 \\ K = 0.17 - 0.26 \\ \tan \delta_{rol} = 0.4 - 1.5 \end{cases}$$

Le formule e i valori precedenti sono stati ottenuti per interpolazione di dati sperimentali, sfruttando i risultati di prove in sito. A rigore un calcolo più realistico del coefficiente d'attrito al rotolamento, dovrebbe essere fatto come perdita d'energia per unità di percorso nella fase di rotolamento, tenendo conto in questo modo delle collisioni tra blocco e pendio.

Un altro modo per studiare il fenomeno del rotolamento e quello di studiare il moto di rotolamento come una serie di piccoli rimbalzi ottenendo risultati più reali ma meno cautelativi dei precedenti (vedi modello CRSP).



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **FASE DEL MOTO VERSO VALLE**

FASE DI MOTO: Rotolamento e scivolamento

Lo scivolamento: Per ciò che attiene la fase di scivolamento, la trattazione è simile al rotolamento tranne che, si utilizza il coefficiente d'attrito allo scivolamento ed il corpo può assumere qualsiasi forma. Sulla base d'osservazioni sperimentali alcuni autori (Bozzolo e Pamini, 1986) hanno evidenziato che fenomeni di scivolamento si verificano **solo nelle fasi iniziali e finali del moto**, e brevi fasi all'impatto (**scorrimento al contatto**). Nel caso dello scivolamento bisogna introdurre nelle analisi un coefficiente dinamico d'attrito allo scivolamento, ricavabile, in questo caso da prove di laboratorio su giunti in roccia (Schneider, 1974).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **EFFETTO DELLA FORESTA**

L'effetto della foresta sui percorsi e la cinematica dei massi può essere tenuta in conto in diversi modi, di cui il più semplice (RAMMS, ROCKFALL V6, etc.), la stessa è parametrizzata dall'altezza effettiva dello strato vegetale (Z_h) e dal coefficiente di resistenza (C_f). Questi parametri sono definiti per ciascuna area forestale in funzione della densità così come riportato in tabella.

Forest type	Effective forest height (Z_h)(m)	Drag coefficient (C_f)
Light forest	5	1000
Medium forest	5	1500
Dense forest	5	2000
Lake/River/Moor	5	50000

L'altezza effettiva dello strato vegetale è stimata approssimativamente corrispondente all'altezza della foresta, la stessa definirà lo spessore dello strato di trascinamento (Z_h). Quando il centro di massa dei blocchi in caduta, si trova all'interno di tale strato, una forza resistente agisce su di esso (fig.13). Questa forza è linearmente proporzionale alla velocità del Blocco V_s e data da:

$$F_{df} = -C_f \cdot V_s$$

Con $C_f = \hat{C}_f$ quando il centro di massa del blocco è sotto Z_h ($Z < Z_h$), altrimenti $C_f = 0$

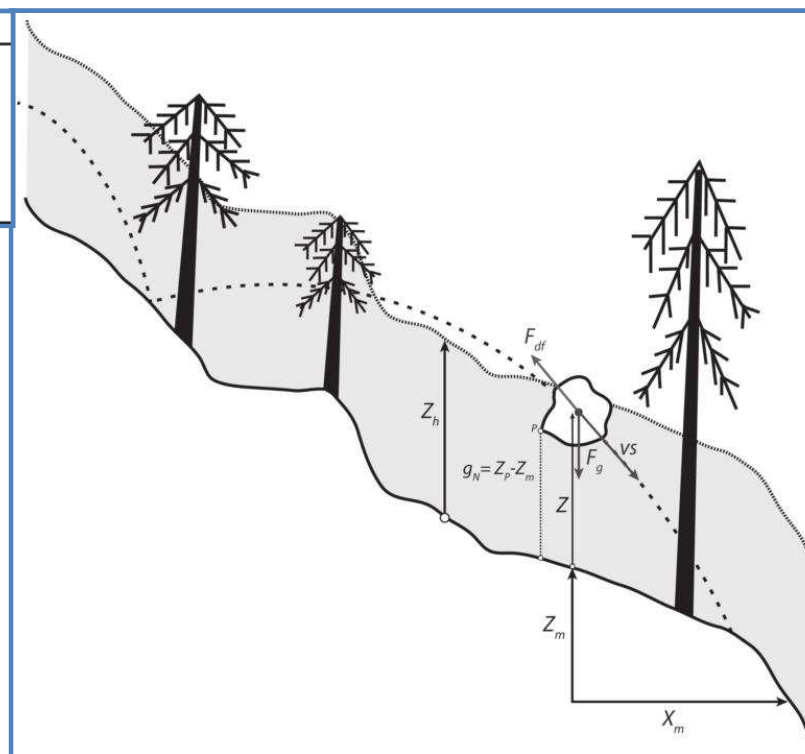


Fig.13: Interazione Blocco -Foresta



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **EFFETTO DELLA FORESTA-ESEMPIO (fonte Rocscience)**

In questo esempio, si vuole valutare l'effetto damping (smorzamento) della foresta sulle traiettorie di caduta massi e sulle proprietà ad esse associate quali, distribuzione dei punti di arresto, distribuzione dell'energia cinetica/totale, delle altezze massime di rimbalzo prendendo in considerazione il pendio generico di fig.14

Si considerano i seguenti quattro casi:

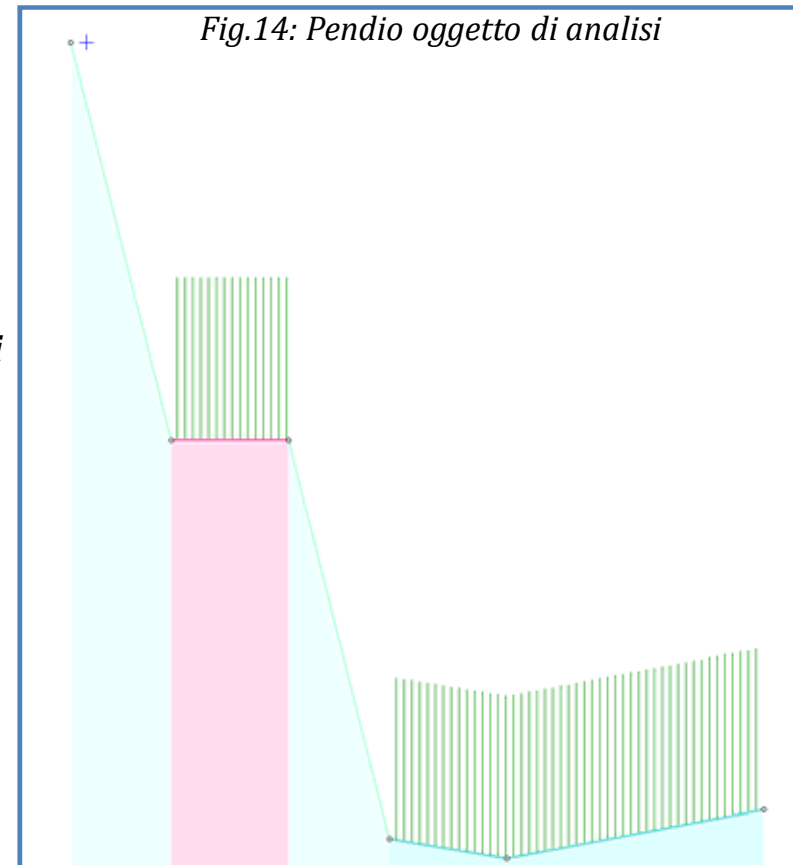
- Nessuna foresta → ***coefficiente di drag=0;***
- Foresta con bassa densità → ***coefficiente di drag=1000;***
- Foresta con media densità → ***coefficiente di drag=1500;***
- Foresta densa → ***coefficiente di drag=2000;***



Open Forest (20 m²/ha Basal Area)

Medium Forest (35 m²/ha Basal Area)

Dense Forest (50 m²/ha Basal Area)



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **EFFETTO DELLA FORESTA-ESEMPIO (fonte Rocscience)**

Il blocco ha forma ottagonale con massa 1000 kg e densità 2700 kg/mc e velocità orizzontale iniziale di 1.00 m/s.

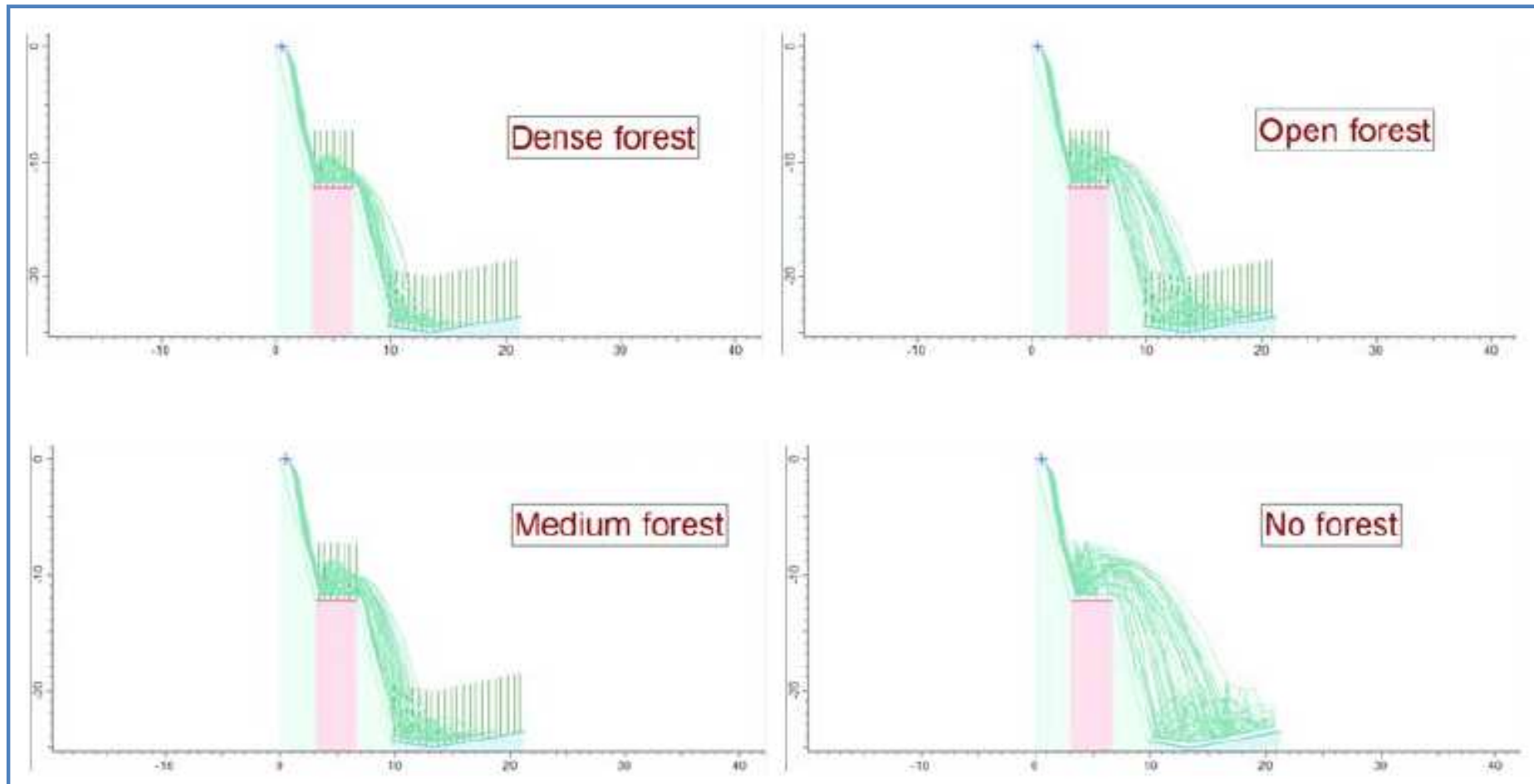
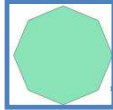


Fig.15: Traiettorie di caduta dei blocchi al variare della densità foresta



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **EFFETTO DELLA FORESTA-ESEMPIO (fonte Rocscience)**

Si può notare come all'aumentare della densità, i percorsi dei blocchi sono più brevi e le velocità in gioco e le relative energie diminuiscono.

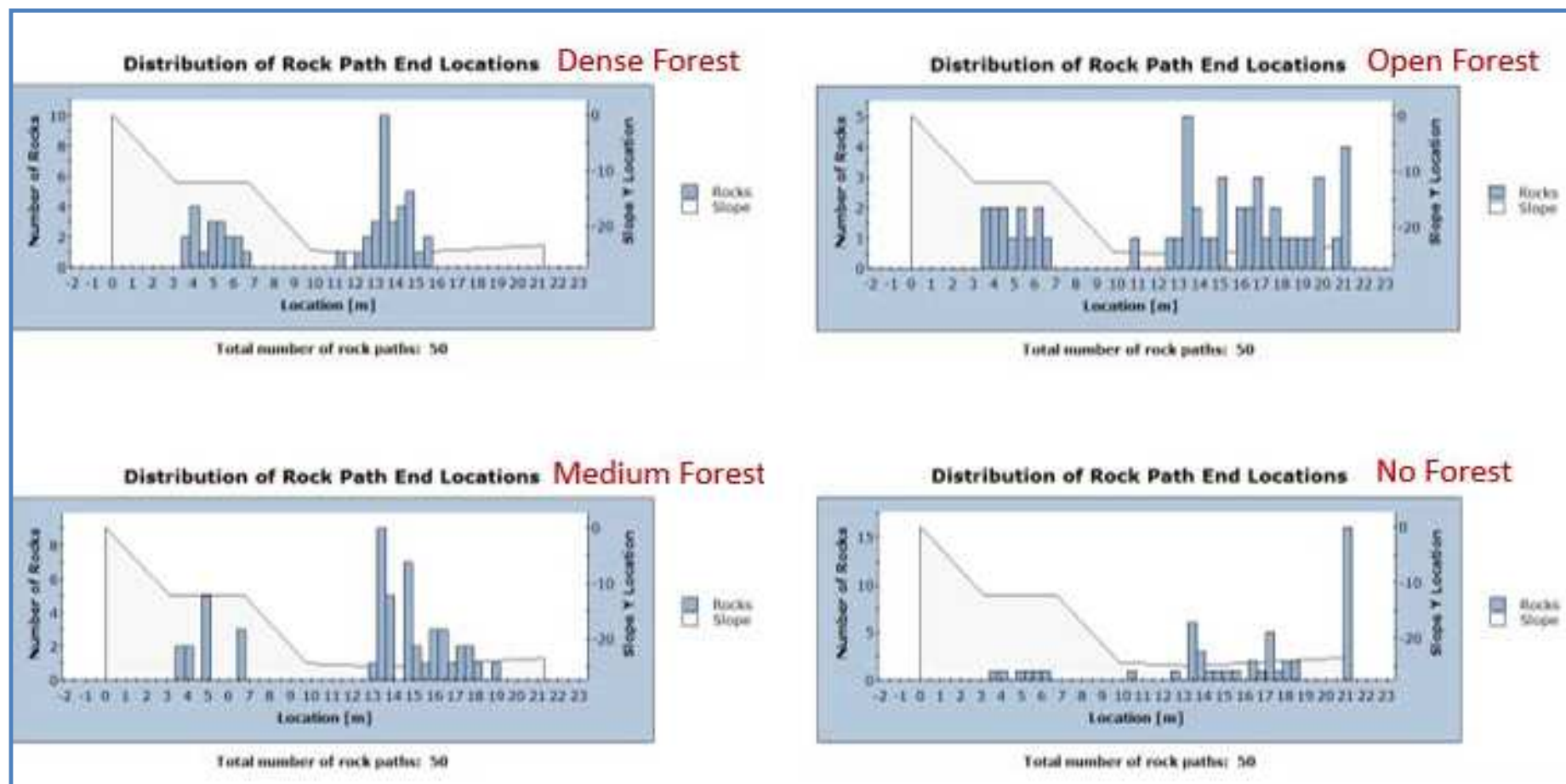


Fig.16: Distribuzione dei punti di arresto blocchi al variare della densità foresta



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **EFFETTO DELLA FORESTA-ESEMPIO (fonte Rocscience)**

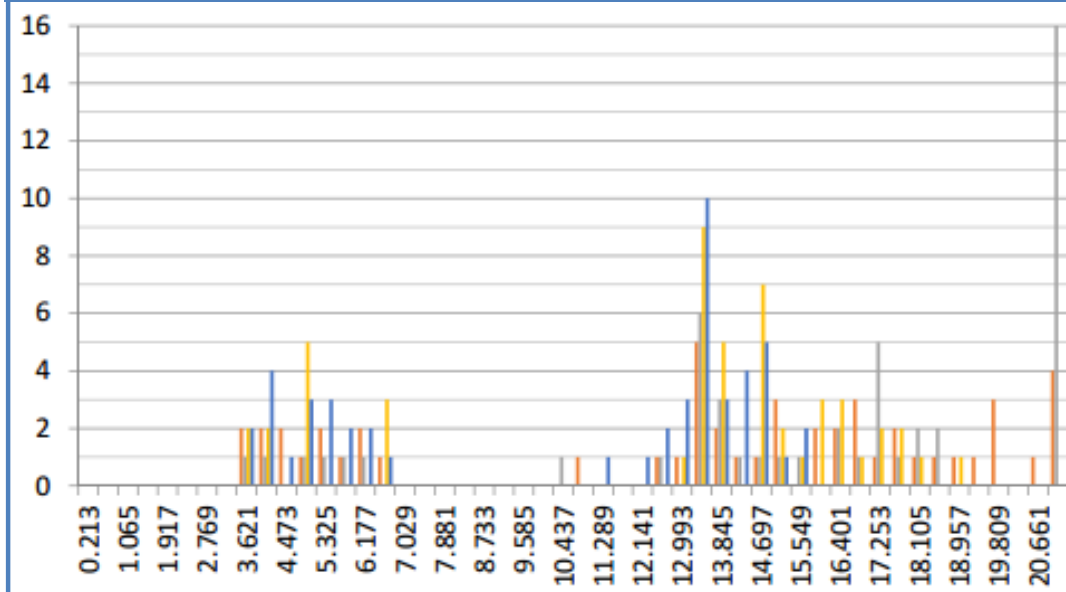
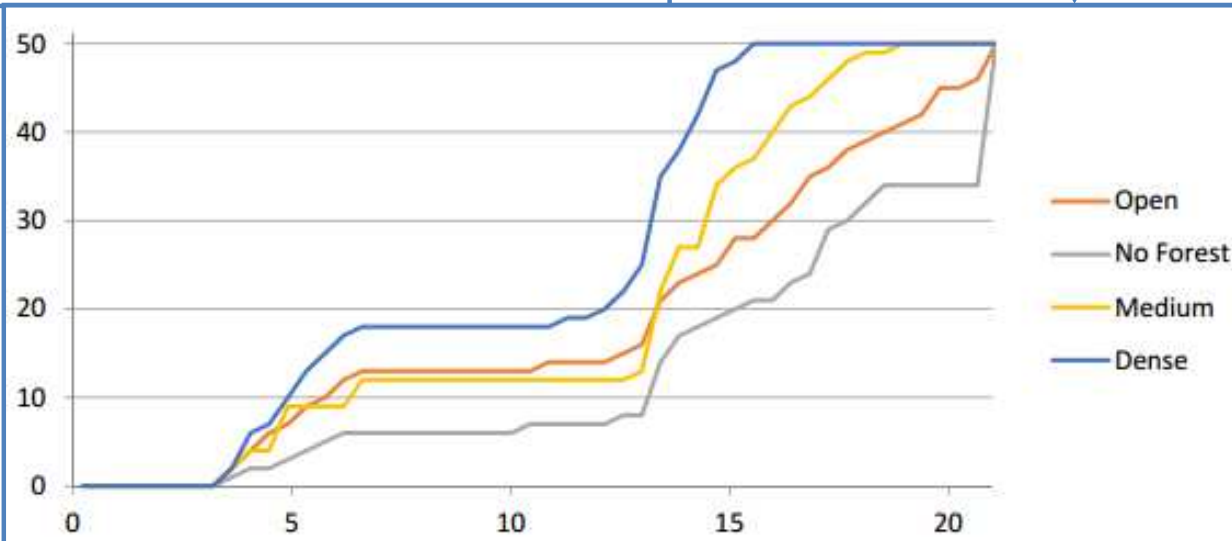


Fig.17: Distribuzione normale e cumulata dei punti di arresto dei blocchi per tutte le tipologie di foreste a confronto



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Effetto dello scarring nella fase di Scivolamento**

Il fenomeno dello scorrimento avviene generalmente nelle fasi iniziali e finali del moto. Le condizioni sono quelle di avere, grandi blocchi che nella fase d'impatto con terreni molto deformabili l'energia per innescare il fenomeno del rimbalzo è molto elevata rispetto allo scorrimento per attrito massimo attivato. La dipendenza del coefficiente di attrito in funzione della distanza percorsa (s) è:

$$\mu(s) = \mu_{min} + 2/\pi (\mu_{max} - \mu_{min}) \arctan(Ks)$$

La distanza (s) di scorrimento è una variabile di transizione che ha un'evoluzione temporale. Fintanto che esiste un contatto attivo con la forza di contatto normale (n)>0 tra terreno e blocco, la distanza aumenta tramite integrazione della velocità del centro di massa del blocco V_s .

L'attrito $\mu(s)$ aumenta quindi con la distanza di scivolamento. Ci sono due parametri K e β che controllano il moto dell'attrito.

- Il parametro K (costante di proporzionalità dell'attrito a scorrimento) controlla quanto velocemente *aumenta* l'attrito da μ_{min} a μ_{max} .
- Il parametro β controlla quanto velocemente l'attrito viene rilasciato è il blocco non lascia la scia prodotta a terra (scarring).

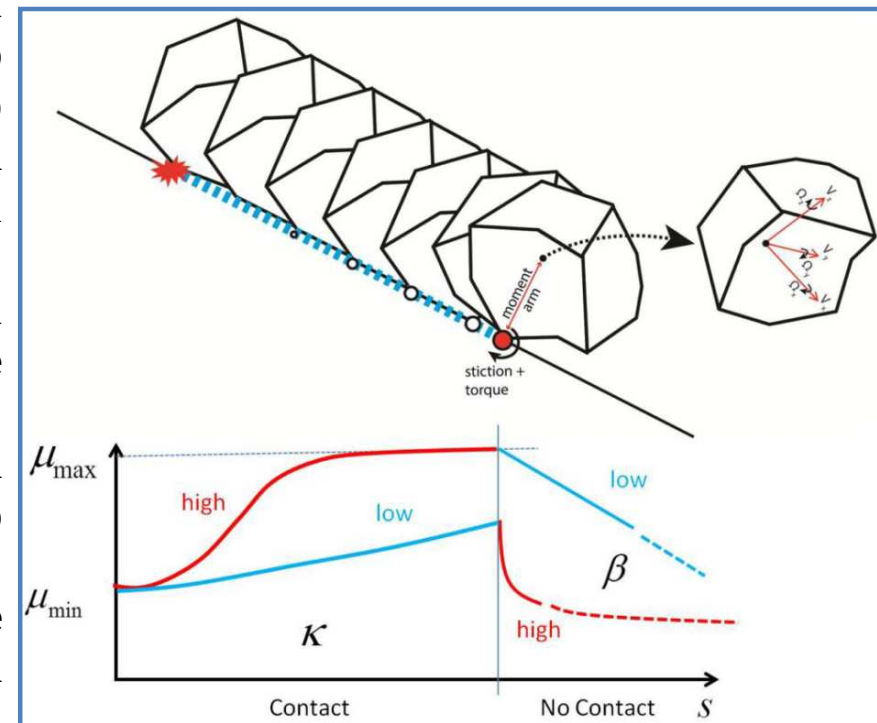


Fig.18: effetto dell'attrito nel moto di scivolamento



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Effetto dello scarring nella fase di Scivolamento**

Il parametro β è legato alla profondità di penetrazione della roccia nel terreno. Le profondità di penetrazione più grandi (materiali più morbidi) sono associati a valori β minori.

Se β è grande, l'attrito viene immediatamente rimosso quando la roccia si allontana dal suolo. Al contrario, quando β è piccolo, l'attrito scorrevole può agire, anche dopo che la roccia non è più in contatto con il suolo che deve riflettere il comportamento fisico che la roccia deve gradualmente superare il mucchio di materiale a terra davanti a esso.

	μ_{\min}	μ_{\max}	β (s ⁻¹)	K (m ⁻¹)	Ground drag	Characteristics
Snow	0.1	0.35	150	2	0.7	Snow-Gliding
Extra Soft	0.2	2	200	1	0.9	
Soft	0.25	2	185	1.25	0.8	
Medium Soft	0.3	2	175	1.5	0.7	
	μ_{\min}	μ_{\max}	β (s ⁻¹)	K (m ⁻¹)	Ground drag	Characteristics
Medium	0.35	2	150	2	0.6	Bedrock
Medium hard	0.4	2	125	2.5	0.5	
Hard	0.55	2	100	3	0.4	
Extra hard	0.8	2	50	4	0.2	

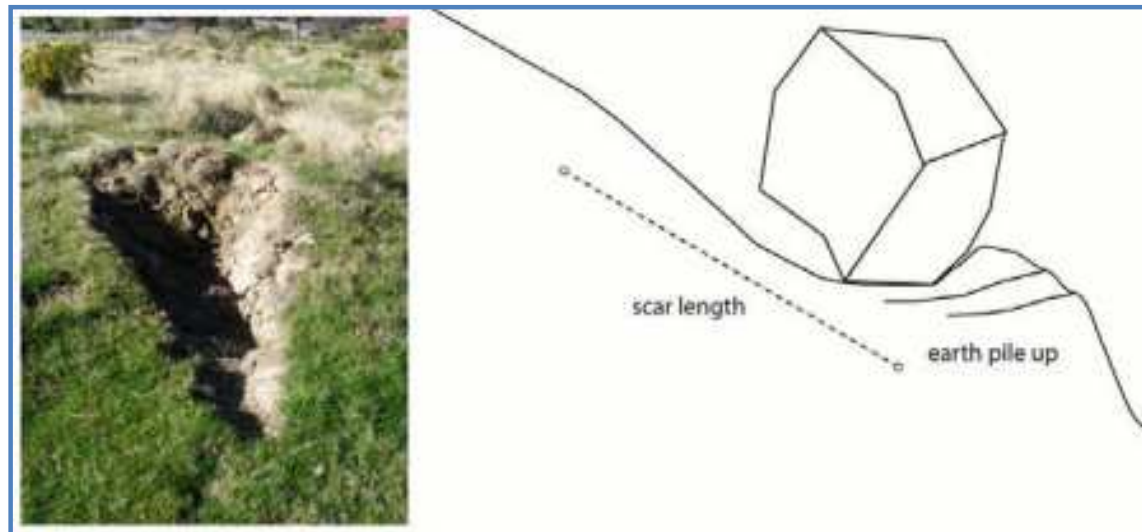


Fig.19: effetto dell'attrito nel moto di scivolamento



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Effetto dello scarring nella fase di Scivolamento**

Viene introdotta un'ulteriore *forza di trascinamento a scorrimento per rappresentare la deformazione viscoplastica che si verifica in terreni morbidi sotto l'impatto del blocco*. Siamo nel campo delle grandi deformazioni viscoplastiche. Il materiale di substrato più duro crea il fenomeno di sgretolamento tra i granuli e il blocco con *dissipazione di energia*. La resistenza del terreno viscoplastica opposta al moto del blocco è data da:

$$F_v = -\frac{m}{2} C_v v_s^2$$

Essa agisce quando il blocco di roccia a contatto con il suolo ($n > 0$) *scivola lungo la superficie del terreno* ($s > 0$). La forza di trascinamento F_v è proporzionale al quadrato della velocità V_s e della massa del blocco m .

Ciò vuol dire che *blocchi in movimento più pesanti e più veloci trascinano i blocchi più piccoli a bassa velocità, mentre penetrano nella superficie del suolo (scarring)*. La forza di trascinamento è *proporzionale all'energia cinetica totale del Blocco*. Il coefficiente di trascinamento C_v varia con il tipo di substrato tra **0.0 (hard) ed 1.00 (soft)**.



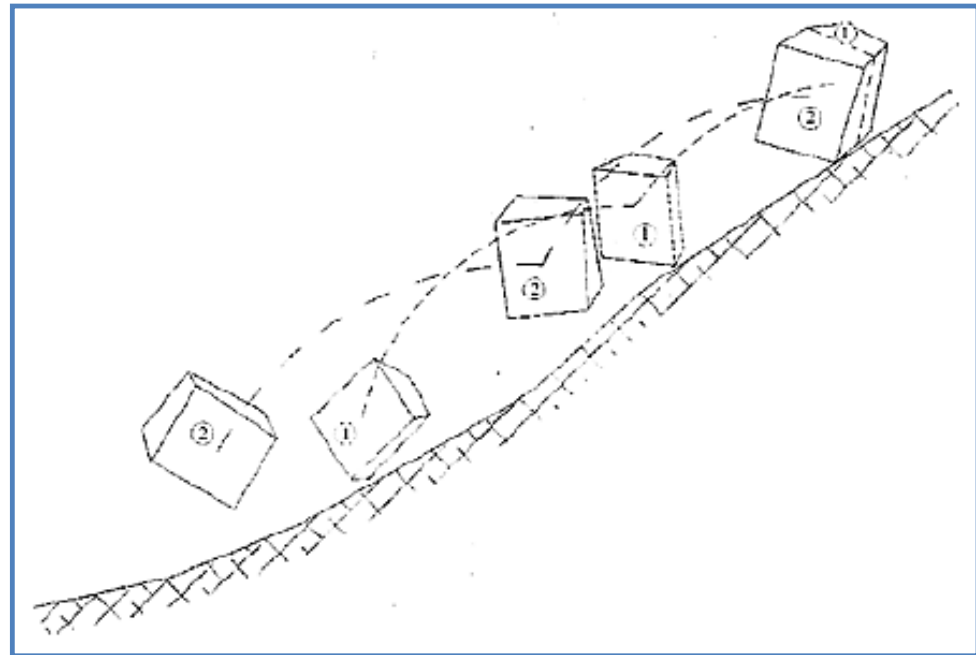
Fig.20: effetto dello scarring nel moto di scivolamento



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Rottura del blocco- impatti principali e secondari**

Blocchi possono subire delle rotture negli impatti, soprattutto se il materiale affiorante è roccioso, e il blocco contiene delle discontinuità. Rotture locali si verificano anche nella fase di rotolamento (rottura di spigoli).

Fig.21: fratturazione del blocco a causa dell'impatto con la superficie del pendio da (Giani, 1995)



Il fenomeno di rottura avviene con grande dispersione di energia, per cui i frammenti che si generano compiono in genere percorsi più brevi. In alcuni casi (fig.21), però la rottura può determinare solidi di forma tabulare che si possono disporre in una condizione di moto più efficiente di quella del blocco originario. Ciò accade in rocce distaccatesi da strutture scistose che all'impatto generano solidi di forma tabulare.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Rottura del blocco- impatti principali e secondari**

- Nel caso di blocchi di rocce tenera lo smussamento degli spigoli nella fasi di rotolamento con collisioni multiple su pendii detritici determinano solidi di forma più arrotondata dunque un moto più efficiente. In ogni caso, *la formazione di schegge (blocchi di piccole dimensioni) a seguito d'impatti su substrati rocciosi, porta ad elevate gittate e altezze di rimbalzo.*
- La modellazione del fenomeno **di rottura del blocco** a seguito dell'impatto è molto complessa da risolvere. L'utilizzo di metodi numerici permette di simulare tale fenomeno in maniera più realistica. *Alcuni autori di modelli Lumped-Mass hanno modellato tale fenomeno utilizzando ipotesi semplificative e un approccio di tipo statistico al problema.*
- In questo secondo approccio (Fornaro e Peila, 1990) calcolano *l'energia necessaria per la rottura del blocco* è confrontata con quella richiesta per la *frantumazione dello stesso* con un martello ad urto, *se l'energia totale che rimane dopo l'impatto raggiunge quella del martello, il modello considera che si sia raggiunta la condizione di rottura e suddivide il blocco in maniera casuale in più frammenti di diverso volume.* L'energia d'impatto è suddivisa in modo proporzionale al volume dei frammenti, *ai quali è data una direzione casuale del successivo movimento.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Rottura del blocco- impatti principali e secondari**

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 per esempio impatti 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 15% indicherebbe che il 15 % dei massi che colpiscono quel tratto di pendio si frantumano).

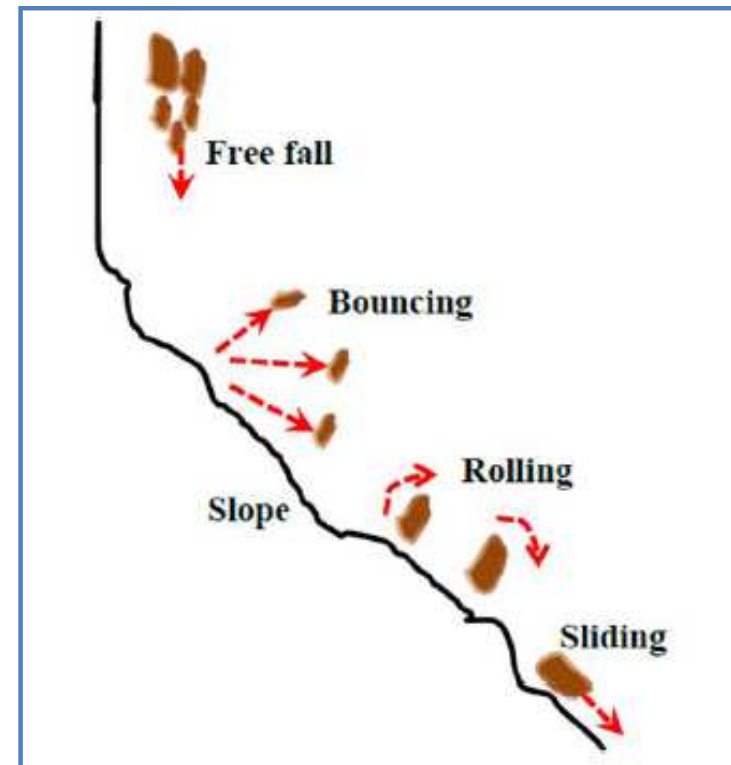


Fig.22: fratturazione del blocco impatto principale



Molto difficile da modellare è la presa in considerazione della 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) (vedi fig.23).

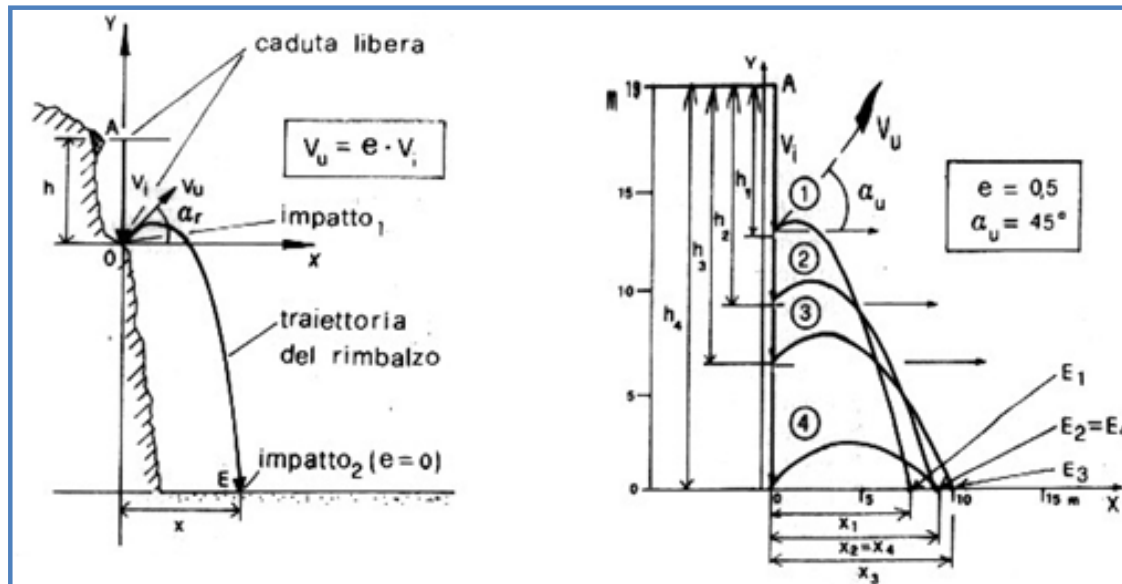


Fig.23: traiettorie di rimbalzo previste per impatti su scarpate rocciose subverticali da [da Hallbauer, 1986]



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Rilevati paramassi: Tra le opere d'intervento passivo per la difesa dalle frane da crollo rivestono particolare importanza i rilevati paramassi in terra o rinforzata. Il vantaggio di questo tipo rispetto alle barriere a rete e la più facile manutenzione ed il migliore impatto ambientale sul territorio. Inoltre hanno una capacità di assorbimento di energia cinetica molto elevata che va dai 3000-6000 kJ **risultando molto efficaci anche per crolli contemporaneo di più blocchi.**

La progettazione e verifica dei rilevati paramassi, è piuttosto complessa, a causa del carattere aleatorio che assume l'analisi previsionale e ***dalla scarsa conoscenza dei fenomeni d'impatto blocco terreno.*** Ciò, spiega perché tale problema non rientra nella pratica corrente della geotecnica e geomeccanica, *e che non esiste ancora oggi una procedura progettuale codificata e disciplinata dalla normativa.*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

REGOLE PROGETTUALI

Ubicazione: i rilevati paramassi sono ubicati nella maggior parte dei casi in corrispondenza delle aree suborizzontali di fondovalle (al piede del pendio). Più raramente, in base alla posizione del manufatto da difendere (vie di comunicazione o abitati), l'opera è realizzata sui segmenti di pendio a debole pendenza. In questo caso, se le caratteristiche meccaniche del pendio sono scadenti bisogna realizzare un secondo terrapieno a valle del primo per incrementare la stabilità del pendio.

Tipologia: lo schema di base dei rilevati (fig.28) ha una forma trapezio o trapezio rettangolo completato:

- **da un vallo a monte del terrapieno** (*con la funzione di bacino di raccolta dei massi, e di rallentarli prima che interagiscono con la barriera*);
- **da una barriera a rete posta sulla sommità del rilevato** (*per evitare il superamento aereo della barriera da parte dei blocchi o delle schegge prodotte dalla frantumazione*).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

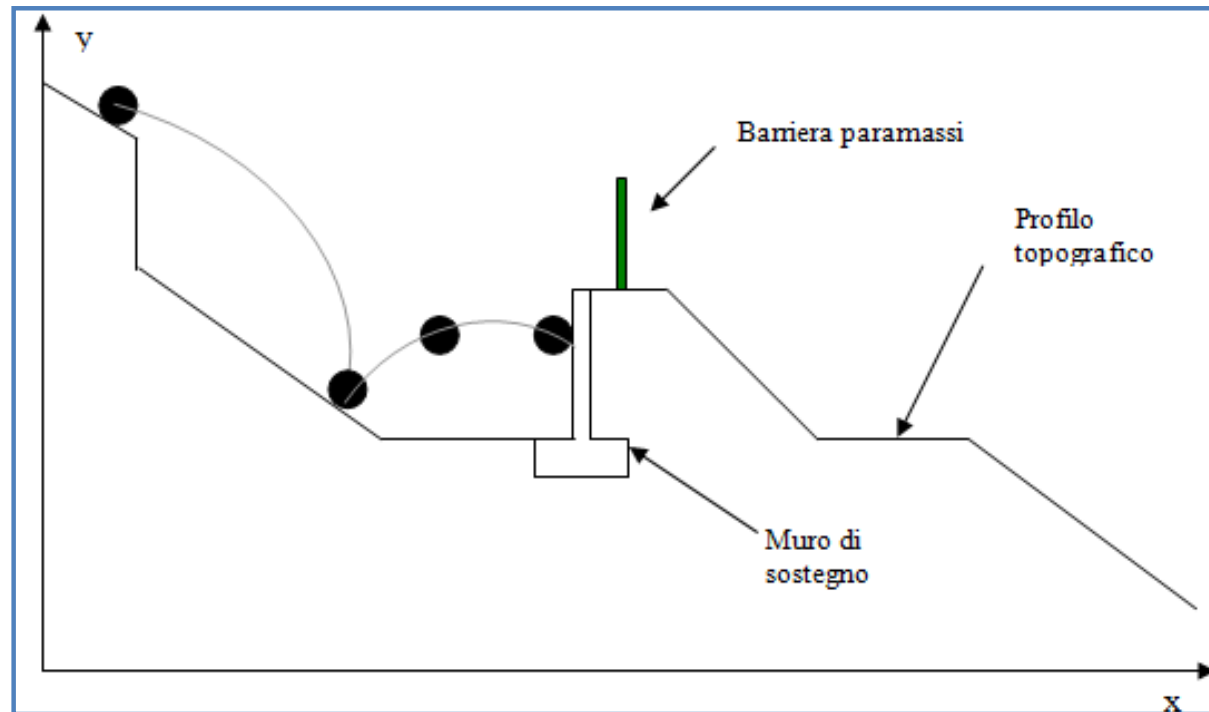


Fig.24 : sezione tipo di un rilevato paramassi con muro di sostegno nella parte di monte.

Le dimensioni tipiche dei rilevati paramassi sono:

- Sviluppo longitudinale (in pianta) variabile tra 200 - 700 m;
- Larghezza di base compresa tra 10 - 12 m;
- Larghezza in sommità compresa tra 4 - 5 m;



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Il corpo del terrapieno: è formato generalmente da materiale ghiaioso-sabbioso, da materiale di risulta derivante dallo scavo del fossato. La parte esterna del terrapieno è *rivestita da materiale sabbioso-argilloso di tipo organico per favorire la vegetazione*. In molti casi vengono integrati dei geosintetici (terre armata) con lo scopo di *incrementare la stabilità del rilevato in campo statico che dinamico (maggiore assorbimento di energia d'impatto) e di ridurre le dimensioni sezionali*. Esistono alcune tipologie più complesse con forme a trapezio rettangolo con il lato di monte del rilevato costituito da un muro che può essere:

- *Calcestruzzo gettato in opera;*
- *In elementi prefabbricati di cls;*
- *In gabbioni.*

Accorgimenti costruttivi: avendo il rilevato un'estensione lineare notevole può risultare un ostacolo al deflusso delle acque superficiali e semiprofonde, per cui bisogna realizzare un *sistema di drenaggio nel rilevato che raccoglie le acque a monte e li convoglia a valle in un apposito canale di raccolta*. Inoltre come per tutti i rilevati deve essere messo in opera a strati di 40-50cm costipandoli.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Interazione dinamica blocco -rilevato Il problema dell'interazione dinamica blocco-terreno durante un impatto, risiede nel calcolo del diagramma di carico dinamico (forze impulsive) che agisce durante l'urto, e delle deformazioni che subisce la barriera (legge sforzi deformazioni assunta per il materiale costituente la barriera). Tali aspetti dinamici dipendono da alcuni fattori quali:

- *Parametri cinematici del blocco all'impatto;*
- *Rigidezza del blocco;*
- *Geometria dell'impronta d'impatto;*
- *Resistenza dinamica alla penetrazione del terreno.*

Quando un blocco urta contro il terreno nascono delle pressioni di contatto all'interfaccia blocco terreno (forze impulsive), se la resistenza del materiale supera tale pressione il blocco penetra nel terreno (*è superata la resistenza al taglio del terreno e si ha la rottura*). Il blocco si arresta quando tutta la sua energia cinetica è spesa per vincere la resistenza alla penetrazione del terreno.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Interazione dinamica blocco -rilevato : La determinazione del diagramma di carico dinamico presenta numerose difficoltà. Esso può essere determinato misurando le decelerazioni che subisce il blocco durante l'impatto. Ciò è stato fatto in laboratorio con penetrometri dinamici (fig.25) a caduta libera e con sistemi sperimentali tipo pendolo di Charpy, evidenziando la variabilità del diagramma (per forma e valore) secondo il tipo di terreno.

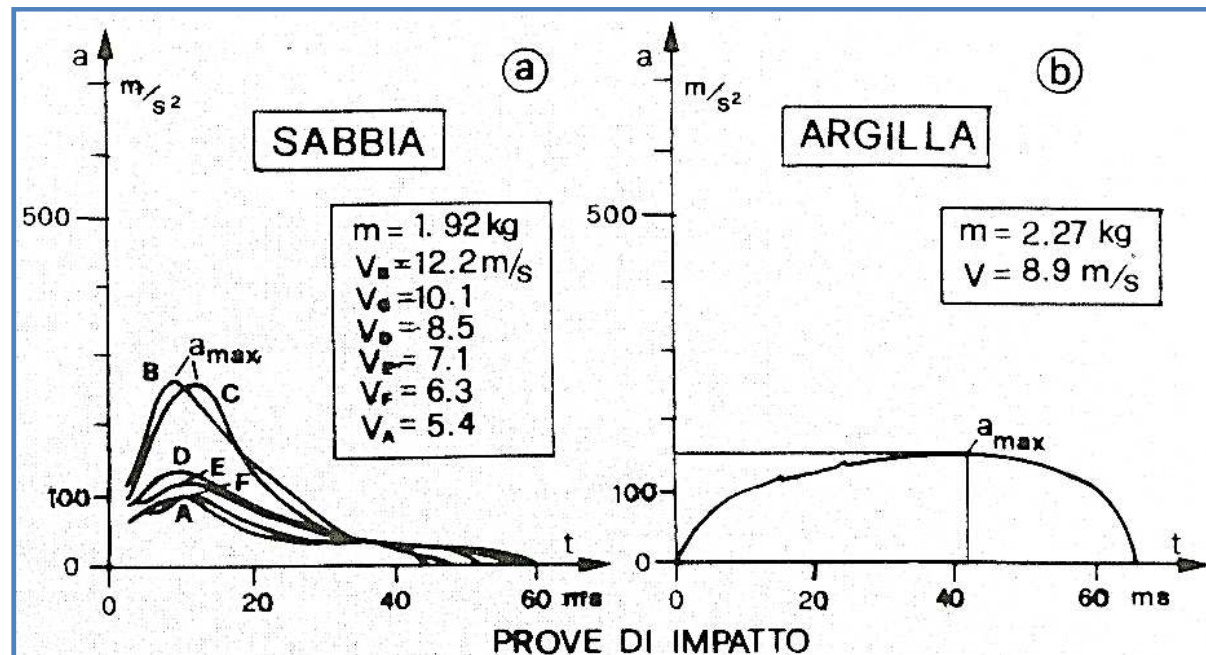


Fig.25 : funzioni di decelerazione per impatti su sabbie[da Knigh,1980] e argille ricostituite in laboratorio [da Levacher, 1985]



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Interazione dinamica blocco -rilevato :

Impatti su sabbie : KNIGHT (1980) fig.29a nel caso di impatti su sabbie ha determinato curve di carico dinamico con tali caratteristiche:

- *Andamento quasi triangolare con picco mediano di valore pari a (60-80 volte il carico statico (forza peso));*
- *Il valore del picco dipende dalla velocità d'impatto (cresce al crescere della velocità in maniera molto sensibile);*

Impatti su argille ricostituite: LEVACHER (1985) fig.29b con prove su argille ricostituite in laboratorio ha trovato per il diagramma di carico:

- *Andamento quasi costante (decelerazione costante) con valore massimo 15 volte la forza peso;*
- *Il massimo cresce in maniera poco sensibile al crescere della velocità d'impatto;*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Verifiche: Le verifiche da effettuare nel caso dei rilevati paramassi sono:

- *Verifica di stabilità del rilevato;*
- *Verifica di stabilità del pendio (su cui insiste il rilevato);*
- *Verifica del rilevato al superamento per proiezione aerea;*
- *Verifica del rilevato al superamento per sfondamento.*

Verifica di stabilità del rilevato: essa deve accertare che la geometria della sezione tipo del rilevato in relazione alle caratteristiche meccaniche del materiale utilizzato nel rilevato assicuri un coefficiente di sicurezza maggiore od uguale ad **1,0** come previsto dalla normativa.

Verifica di stabilità del pendio: nel caso in cui il terrapieno insiste su un pendio, bisogna verificare l'influenza del rilevato sulla stabilità del pendio. E necessario determinare il fattore di sicurezza del pendio tenendo conto dell'effetto del sovraccarico (rilevato), della sua posizione, delle condizioni litostratigrafiche e idrogeologiche del pendio (caratteristiche meccaniche del materiale costituente il pendio, localizzazione d'eventuali falde etc.). *Il fattore di sicurezza deve essere superiore ad 1,0 come previsto dalla norma.*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Verifica al superamento del rilevato per proiezione aerea: tale verifica consente di accertare l'efficacia dell'intervento. Il calcolo risiede nella scelta dei requisiti geometrici ottimali da assegnare alla barriera che garantisce un'alta funzionalità d'intercettazione di blocchi in volo. Per il calcolo delle proiezioni aeree da utilizzare nella verifica si può far riferimento ad un modello cinematico bidimensionale. La verifica va fatta per due tipi di traiettorie aeree:

- *Traiettorie di rimbalzo;*
- *Traiettorie d'esplosione (proiezione aerea che si produce per effetto della frantumazione del blocco in conseguenza dell'impatto).*

le registrazioni filmate in sito con prove sperimentali hanno portato alle seguenti considerazioni sulle traiettorie di rimbalzo:

- *Sui segmenti inferiori (angoli inferiori a 25°) dei coni detritici si sono osservati rimbalzi degli elementi più voluminosi (0.1-10 mc) con altezze massime di 4-5 m e gittate dell'ordine di 40-50 m;*
- *Sui segmenti apicali (inclinazioni tra 45°-60°) le traiettorie di rimbalzo hanno raggiunto altezze massime di 5-6m;*
- *Le altezze di volo più frequenti ($\geq 50\%$) sono comprese tra 0-1 m, e si riducono alle quote inferiori;*
- *Le velocità sono comprese tra 1-30 m/s.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Verifica al superamento del rilevato per proiezione aerea: Traiettorie di rimbalzo:

La verifica al superamento aereo per le traiettorie di rimbalzo può essere effettuata in tre modi

1. *Utilizzando i valori limite d'altezze e gittate misurate nelle prove sperimentali ;*
2. *Con riferimento all'involuppo delle traiettorie ottenute da un calcolo di tipo probabilistico;*
3. *Utilizzando un calcolo di tipo parametrico (vedi fig.26) con le seguenti ipotesi:*

- *Considerare aleatorio l'angolo di rimbalzo ed il coefficiente di restituzione, attribuendo velocità di rimbalzo in base al criterio d'impatto;*
- *Schematizzazione del profilo del pendio comprendente la sezione del rilevato e del fossato di monte;*
- *Rimbalzo in corrispondenza del punto di minima quota, a monte dell'opera;*
- *Esecuzione di un numero significativo di simulazioni cinematiche con restituzione ed angolo di rimbalzo variabili scartando i valori di gittata e rimbalzi che non anno riscontro nel fenomeno reale.*

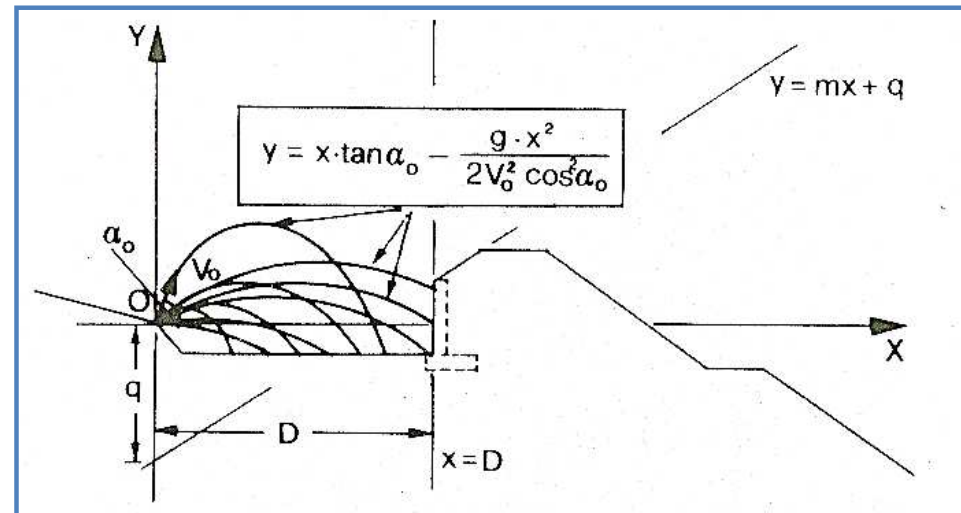


Fig.26: modello cinematico utilizzato per la verifica al superamento della barriera per proiezione aerea [da Paronuzzi, 1989]

Nel caso di verifica non soddisfatta, bisogna modificare la geometria della sezione del rilevato e del fossato di monte, oppure spostare l'ubicazione del rilevato (vedi fig.26).



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Traiettorie d'esplosione: la rottura violenta dei blocchi per effetto degli urti su substrati rocciosi, porta alla formazione di schegge dotate di velocità individuali superiori a quella d'impatto. Tutto questo comporta una serie di conseguenze che sono:

- *Velocità elevatissime (tra 30 e 70m/s);*
- *Volumi modesti (0.01-0.5mc);*
- *Traiettorie notevoli (gittate comprese tra 50-160m ed altezze massime tra 5-25m).*

A causa di ciò vengono meno le seguenti ipotesi:

- *La resistenza all'aria non è più trascurabile e le traiettorie non sono paraboliche;*
- *A causa della frammentazione del blocco non è più valido il criterio d'urto;*

Quindi si dovrebbero utilizzare modelli con formulazioni più complesse che includono forme irregolari e la rottura del blocco. Osservando però che le altezze di rimbalzo sono superiori a qualsiasi barriera, l'unico modo di risolvere il problema è di minimizzare la rottura dei blocchi. Per ottenere ciò si può operare in due modi:

1. *Alla base della scarpata rocciosa, predisponendo coperture artificiali di materiale detritico e riducendo le pendenze (terrazzamenti);*
2. *Immediatamente a monte della barriera, realizzare un fossato di raccolta in detrito e terra in modo da evitare l'esplosione dei blocchi.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Verifica al superamento per sfondamento: tale verifica permette di accertare che il blocco non superi la barriera penetrando e portando il terrapieno al collasso. Durante l'urto blocco-barriera le tensioni generate dal carico dinamico superano di gran lunga la resistenza al taglio della barriera, portando il blocco a penetrare nella barriera. Dal punto di vista della verifica il problema è ricondotto al calcolo (fig.27):

- *Del carico dinamico impulsivo che agisce durante l'interazione;*
- *Della profondità di penetrazione;*

Questi parametri dipendono da:

- *Parametri cinematici, di rigidità, massa e forma del blocco;*
- *Parametri di resistenza all'impatto del materiale costituente la barriera;*
- *Geometria ed ubicazione della superficie di impatto;*
- *Legge sforzi - deformazioni assunta;*

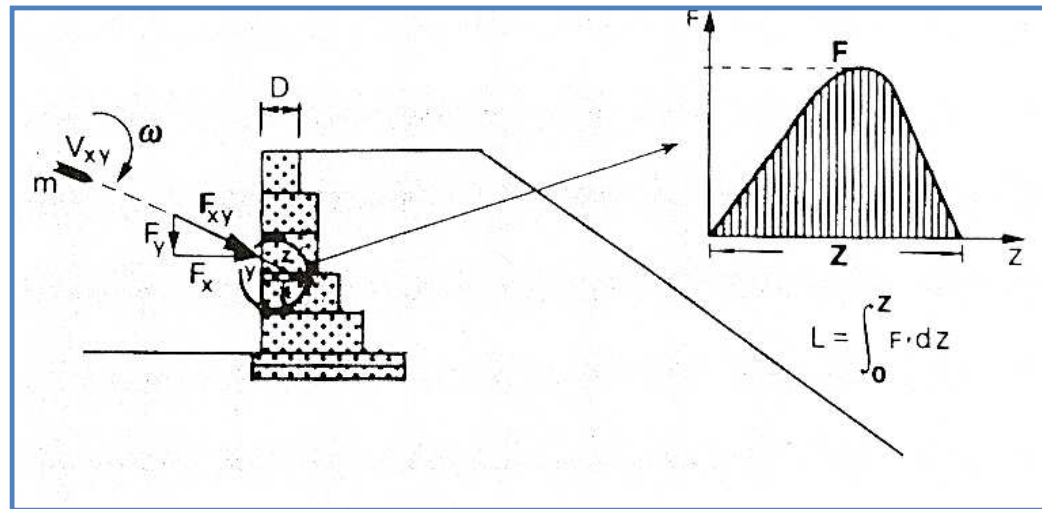


Fig.27: Condizioni al contorno ed ipotesi di carico dinamico per un blocco che impatta.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Determinazione del carico dinamico: Il carico dinamico che agisce durante l'urto può essere determinato applicando il teorema dell'impulso nella seguente forma : $p = \int_0^T F_u \cdot dt$
 Il valore massimo della forza impulsiva e l'andamento del carico dipende dal tipo di materiale vedi fig.27 e 28.

tipo di materiale del terrapieno	Andamento del carico	Valore massimo del carico impulsivo
Argille ricostituite in laboratorio	costante	$F_{\max} = \frac{m \cdot v}{T}$
Materiali ghiaiosi sabbiosi e materiali rigidi (cls)	triangolare	$F_{\max} = \frac{K \cdot m \cdot v}{T}$

Dove :

- ♦ K varia da 3.68 a 1.57 passando da un materiale a comportamento elastico a plastico. Zebhart successivamente propone di utilizzare per tutti i terreni $K=2.022$.
- ♦ $T = 3.335 \cdot \frac{z}{v}$ (Kar, 1979) valida per diagrammi di forma triangolare;

dove : m, v, T, z sono rispettivamente la massa e la velocità del blocco che impatta, la durata dell'impatto e la profondità di penetrazione.

Fig.28: Valori massimi del carico dinamico durante l'impatto blocco- rilevato.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

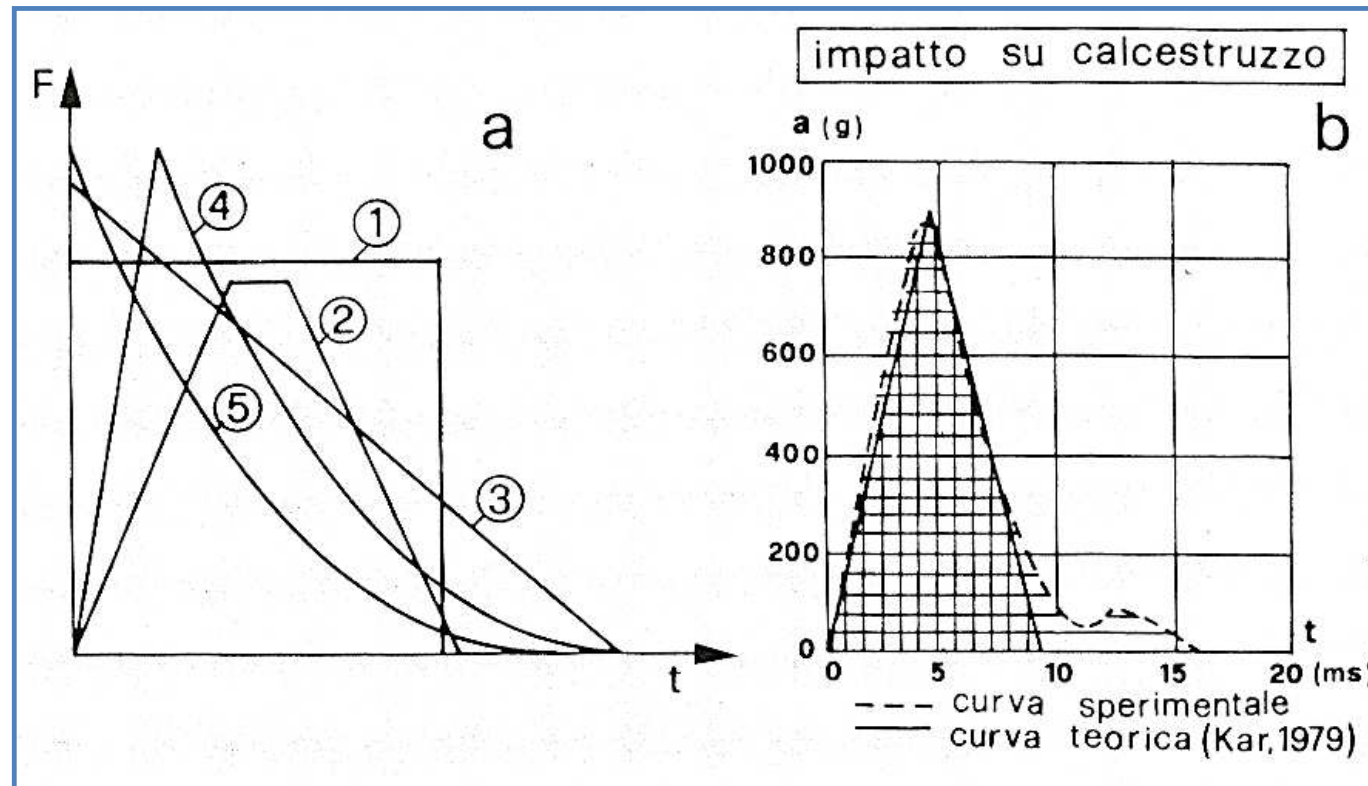


Fig.29: funzioni di carico dinamico per impatti su materiali con diverso comportamento meccanico [da Kar, 1979]

Determinazione della profondità di penetrazione: la profondità di penetrazione è stata ricavata da KAR (1978), che propone due espressioni diverse, secondo il tipo di materiale di cui è costituito il terrapieno (vedi fig.29).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Determinazione della profondità di penetrazione: la profondità di penetrazione vale:

Tipo di materiale del paramento a monte del rilevato.	Profondità di penetrazione z [cm]
<i>Terrapieni deformabili (terra, gabbionate, etc.)</i>	$Z = \frac{27183}{\sqrt{Y}} \cdot N \cdot \left(\frac{E}{Es} \right)^{1.25} \cdot \frac{P}{(d)^{2.31}} \cdot \left(\frac{v}{1000} \right)^{1.25}$
<i>Terrapieni rigidi (paramenti in cls)</i>	$Z = \frac{1202328}{\sqrt{Y}} \cdot N \cdot \left(\frac{E}{Es} \right)^{1.25} \cdot \frac{P}{(d)^{2.8}} \cdot \left(\frac{v}{1000} \right)^{1.8}$

Dove:
$$\begin{cases} Z = (z / 2d)^2 & \text{se } z / d \leq 2 \\ Z = [(z / d) - 1] & \text{se } z / d > 2 \end{cases}$$

- ◆ Y [kN/m²] resistenza alla compressione semplice del terreno;
- ◆ E [kN/m²] modulo elastico del blocco;
- ◆ Es [kN/m²] modulo di elasticità dell'acciaio;
- ◆ P [kg] peso del blocco;
- ◆ d [cm] diametro massimo dell'impronta d'impatto;
- ◆ v [m/s] velocità di impatto;
- ◆ N fattore di forma variabile tra 1 (blocco appuntito) a 0.72 (blocco piatto);

Fig.30: formule empiriche della profondità di penetrazione ottenuti da Kar(1979);

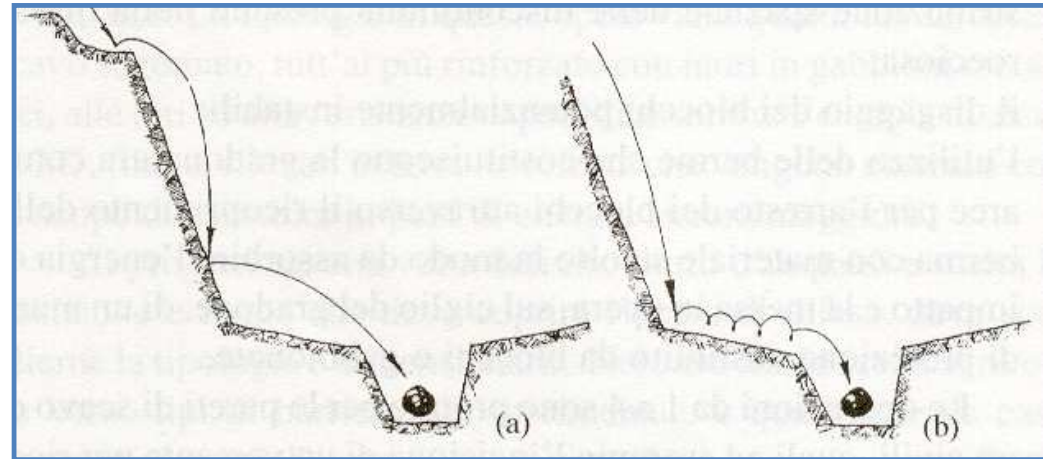
La verifica allo sfondamento richiede il confronto tra la **profondità di penetrazione** con una **profondità limite**, che può essere o **lo spessore del rilevato**, oppure una profondità al di sopra della quale **il rilevato deve essere ripristinato**.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Valli – Trincee e Fossati di Raccolta: Il sistema di raccolta è stato studiato da Ritchie (1963) per raccogliere blocchi che si staccano da pareti rocciose sub verticale d'altezza massima di 40 m. L'intervento è costituito dallo scavo di un fosso rinforzato e ringrossato sulla parte di valle e dalla messa in opera di una rete di protezione a valle del sistema.

Fig.31: fossato di raccolta per arrestare i blocchi dopo una fase di rimbalzo(a) o di rotolamento(b) da[Giani,1992]



Ritchie (1963) sulla base di risultanze sperimentali osserva tre tipologie di moto in funzione dell'inclinazione della parete (vedi fig.36):

- *Caduta libera per inclinazione superiore ai 75°;*
- *Rimbalzi per inclinazioni comprese tra 45° e 75°;*
- *Rotolamento per inclinazioni inferiori a 45°;*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Valli – Trincee e Fossati di Raccolta: Secondo i risultati di Ritchie, lo scavo del fossato costituisce una modifica di morfologia del versante (fig.31), che determina un cambio di movimento che passa da **rotolamento a caduta libera**. In questo caso l'impatto avviene con un valore **di velocità normale superiore a quella tangenziale** e siccome il **coefficiente di restituzione normale è generalmente inferiore a quello tangenziale**, la presenza del fossato determina **una perdita di energia cinetica**,

Accorgimenti migliorativi: Per incrementare la *quantità d'energia dissipata nell'impatto* è utile ricoprire il fondo del fossato *con uno spessore da 30-50 cm di materiale assorbente (materiale sciolto)*, che *da un lato limita i rimbalzi (diminuzione del coefficiente di restituzione normale)*, dall'altro *riduce fenomeni di rottura dei blocchi con esplosione di frammenti*.

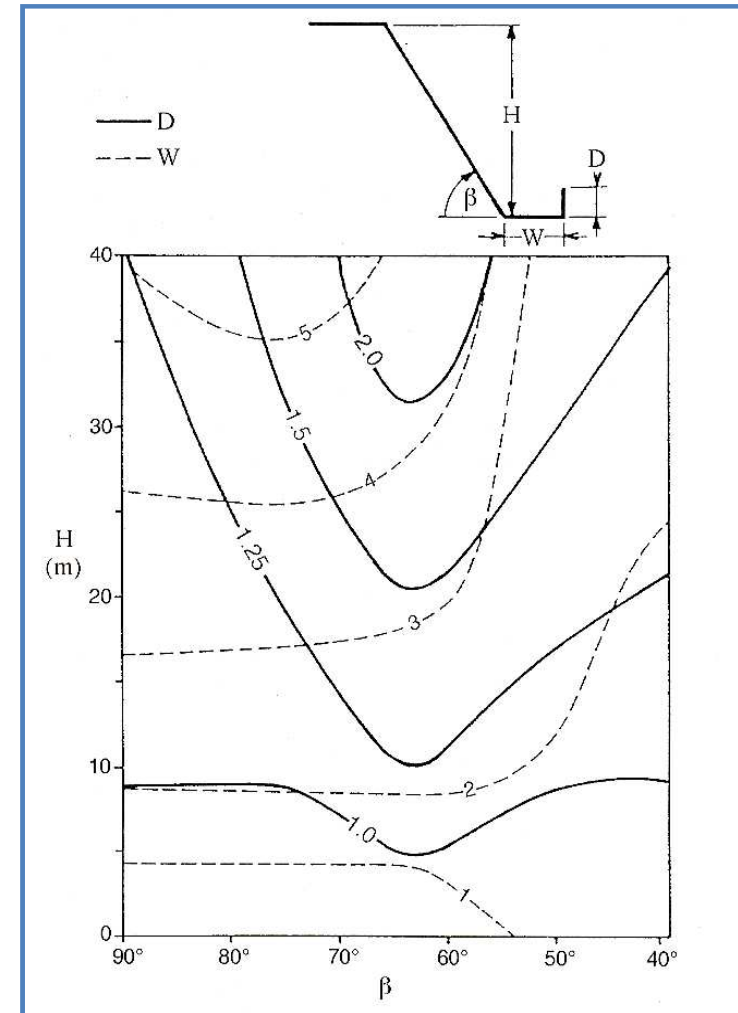
La parte di valle del fossato è rinforzata e ringrossata. Il rinforzo può essere effettuato, con *gabbioni metallici o altre strutture deformabili che differentemente dalle strutture in cls possono essere ripristinate con maggiore rapidità ed economicità*. Il ringrosso ha lo scopo *di evitare la risalita dei blocchi*, può essere costituito da un rilevato rinforzato con geogriglie sul paramento che si affaccia sul fossato. *La barriera paramassi é installata sulla sommità del rilevato, ed ha lo scopo di intercettare eventuali frammenti derivanti dalla rottura del blocco.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Valli - Trincee e Fossati di Raccolta: Il progetto del fossato consiste nell'individuare i principali parametri geometrici che definiscono il sistema, quali la larghezza e l'altezza del fossato (ed eventualmente l'altezza della barriera). Studi ha carattere prettamente sperimentale sono stati proposti da Ritchie (1963), Fookes e Sweeney (1976), Whiteside (1986), Mak e Blomfield (1986) che hanno portato alla definizione dell'abaco di fig.32 , che riporta la larghezza e l'altezza del fossato in funzione dell'altezza del pendio e della sua inclinazione.

Fig.32 : abaco per il dimensionamento del fossato. In alto le caratteristiche geometriche del problema, al centro i diagrammi forniti da Whiteside(1986) ottenuti elaborando i dati sperimentali di Ritchie(1963).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.**

Gallerie paramassi: Gallerie artificiali (fig.33) sono realizzate a protezioni sedi stradali o ferroviarie, quando per le condizioni geomorfologiche del versante risulta difficile se non impraticabile adottare altre soluzioni quali barriere, rilevati etc. L'opera ha la funzione di permettere il passaggio dei massi senza danneggiamenti strutturali.

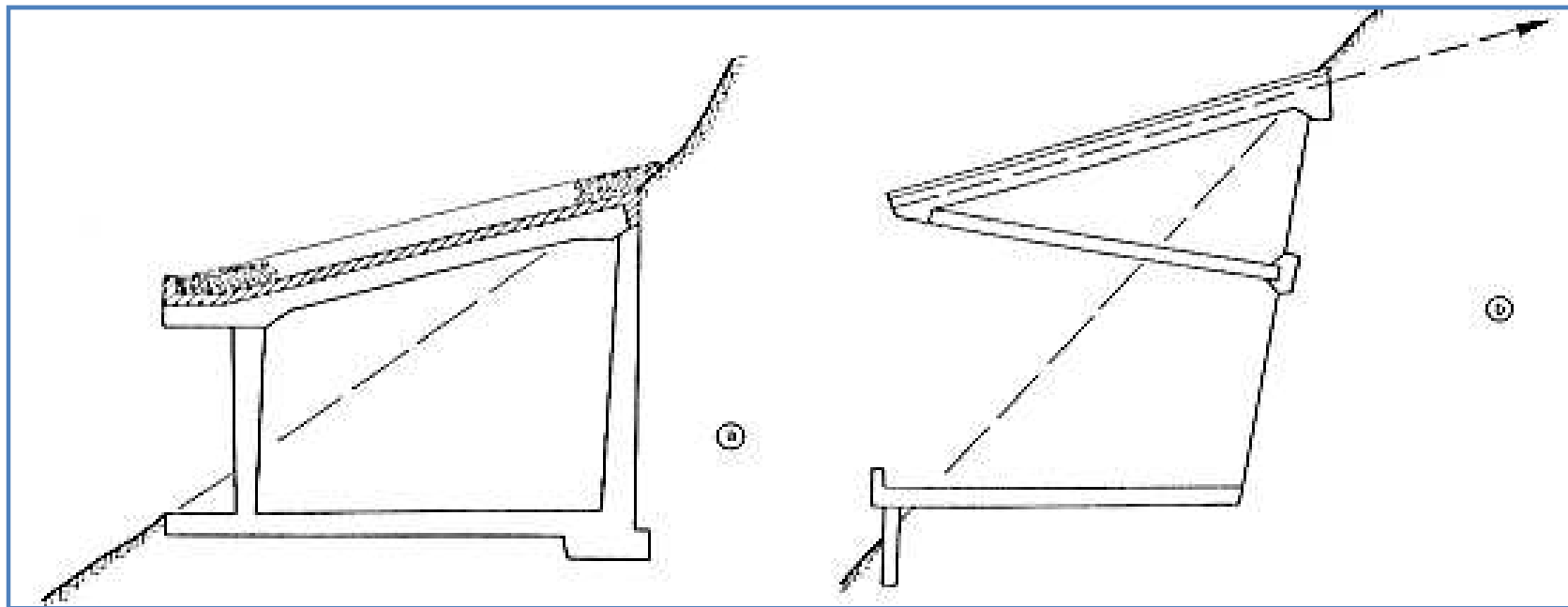


Fig.33: sezione schematica della galleria di protezione. (a) con presenza di materiale assorbente; (b) copertura mensola controventata e assenza di spalla anteriore.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Gallerie paramassi: Procedimenti per il dimensionamento di queste gallerie é stato affrontato da Kirsten (1982) su sistemi di copertura a mensola. Ricerche recenti sono state svolte presso il politecnico di Losanna da (Montani, Descouders e Egger, 1996), per l'elaborazione di metodi di calcolo di piastre in C.A, ricoperto da uno strato di materiale sciolto assorbente e soggette all'impatto provocati da caduta di blocchi. I parametri più importanti per il calcolo sono:

- *Dimensione e forma dei blocchi, velocità di caduta e angolo d'impatto;*
- *Lo spessore del materiale assorbente, la natura, la granulometria, la densità relativa e l'angolo di resistenza al taglio;*
- *La tipologia e le condizioni di vincolo della struttura, la rigidezza e la resistenza, la frequenza d'oscillazione propria, l'inclinazione del tetto della galleria, dei tiranti d'ancoraggio e delle fondazioni*

Il calcolo di una galleria è molto complesso, poiché richiede un'analisi dinamica della struttura soggetto all'azione impulsiva del blocco e nel determinare le forze dinamiche che lo stesso trasferisce alla struttura tramite il materiale assorbente. Una semplificazione di calcolo e di verifica di queste strutture risiede nel calcolo della massima forza trasmessa dal blocco alla copertura è nell'effettuare un'analisi statica.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Gallerie paramassi: Per studiare il comportamento di queste strutture soggetti all'impatto di blocchi vengono eseguiti prove sperimentali su cui vengono formulati i modelli di calcolo per le verifiche. Le prime prove d'impatto in laboratorio sono state eseguite al politecnico di Losanna (vedi fig.39). Gli elementi principali di tale prova sono stati:

- *Una piastra di C.A di dimensione 3.40*3.40m, di spessore di 20cm appoggiata in corrispondenza degli estremi, armata con una percentuale d'armatura dello 0.6%;*
- *Copertura di uno spessore di materiale assorbente variabile da 35 cm a 100cm;*
- *Impatto di blocchi di masse variabili da 100 kg a 1000 kg;*
- *Altezze di caduta variabili tra 1m e 10m.*

Durante le prove sono stati misurati nel tempo le seguenti grandezze (fig.40):

- *Accelerazione e velocità del blocco;*
- *Penetrazione del blocco all'interno dello strato assorbente;*
- *La pressione e gli spostamenti della piastra;*
- *Le reazioni d'appoggio;*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Gallerie paramassi: Prove sperimentali al politecnico di Losanna

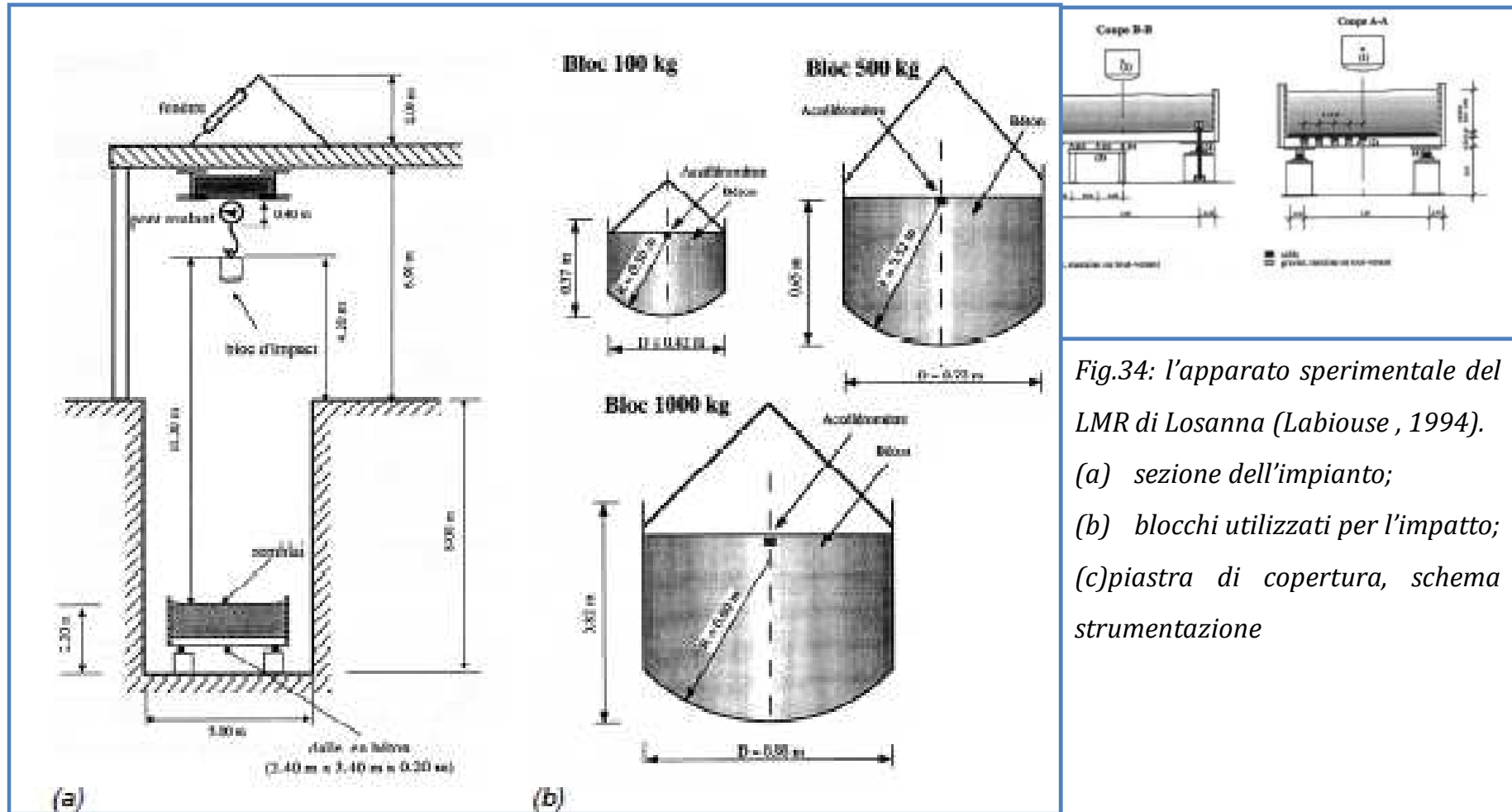


Fig.34: l'apparato sperimentale del LMR di Losanna (Labrousse, 1994).

(a) sezione dell'impianto;

(b) blocchi utilizzati per l'impatto;

(c) piastra di copertura, schema strumentazione



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

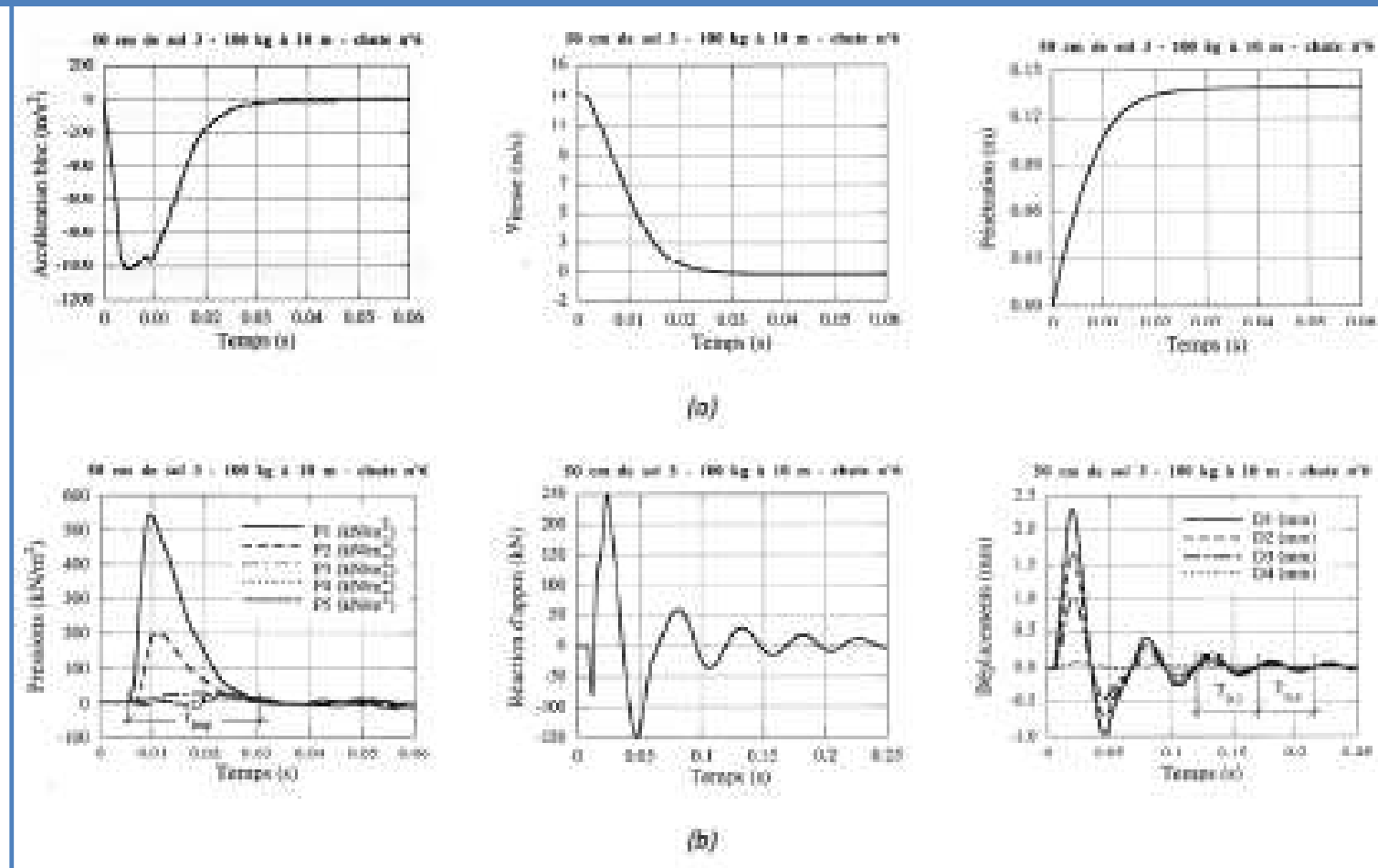


Fig.35: risultati di un impatto tipo; (a) accelerazione, velocità e spostamento (penetrazione) del blocco; (b) pressioni sulla piastra, reazione d'appoggio, spostamenti della piastra (da Labiouse,1994)



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

Gallerie paramassi → Modelli di calcolo : scopo delle prove sperimentali sono:

1. *quello di determinare tramite correlazioni statistiche dei parametri di progetto valori di progetto per la stima della massima forza all'impatto e della profondità di penetrazione del blocco (vedi fig.36);*
2. *Formulazioni di modelli dinamici d'impatto da validare e calibrare dalle risultanze dei test sperimentali*

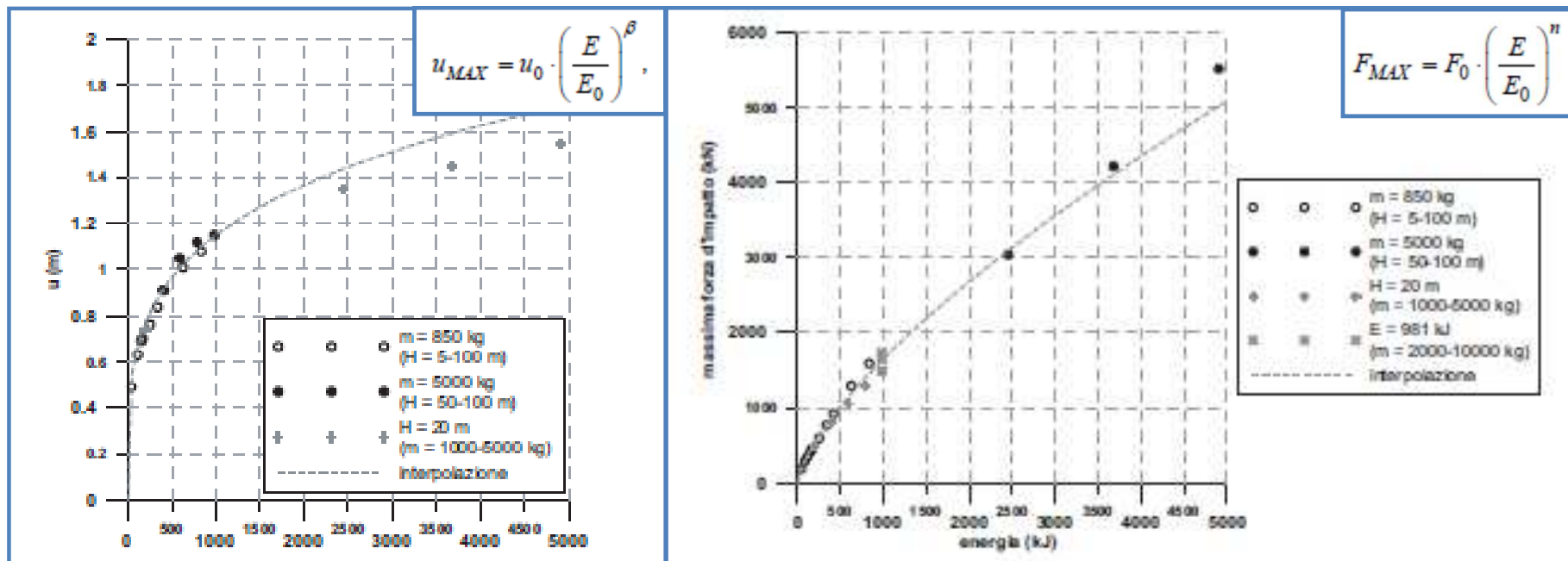


Figura 36 : penetrazione del blocco in funzione dell'energia d'impatto e forza d'impatto massima in funzione dell'energia



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.**

BARRIERE PARAMASSI : Generalità:

Lo scopo principale delle barriere è quello intercettare (non superamento cinematico) ed assorbire l'energia cinetica del masso e dissiparla. Tutto ciò avviene per:

- Trasformazioni in calore per attrito tra diverse parti della struttura soggette ad una forza di contatto, ad uno spostamento relativo ed ad un coefficiente d'attrito (ad esempio cerniere imperfette, funi a scorrimento relativo);
- Trasformazione in calore per attrito tra il blocco in moto e parti della struttura;
- Trasformazione in calore per attrito tra la struttura in moto ed il suolo;
- Deformazioni plastiche di parti soggette ad una forza di plasticizzazione (tipo anelli, dissipatori etc);
- Trasformazioni in calore per attrito tra le parti della struttura del moto elastico smorzato associato alle deformazioni elastiche.

La forza che il masso esercita sulla struttura è inversamente proporzionale alla sua deformabilità.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Classificazione Linee guida ETAG 027 e NORME UNI 11211-4

Una barriera paramassi è composta da:

- a) una struttura di intercettazione, che ha la funzione di sostenere l'impatto diretto del blocco, deformandosi in modo elastico e/o plastico, e di trasmettere le tensioni alle strutture di connessione e di supporto e alle fondazioni;*
- b) una struttura di supporto, che ha la funzione di mantenere tesa la struttura di intercettazione, per sua natura non rigida. Può essere collegata alla struttura di intercettazione direttamente o attraverso una struttura di connessione.*
- c) elementi di connessione, che hanno la funzione di trasmettere le tensioni alle fondazioni. Per consentirne la deformazione possono essere installati meccanismi che permettano un allungamento graduale.*

Le fondazioni non sono considerate parte del kit ETAG 027. Il progetto delle fondazioni è responsabilità del progettista, che è tenuto ad attenersi alle disposizioni di legge nazionali.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

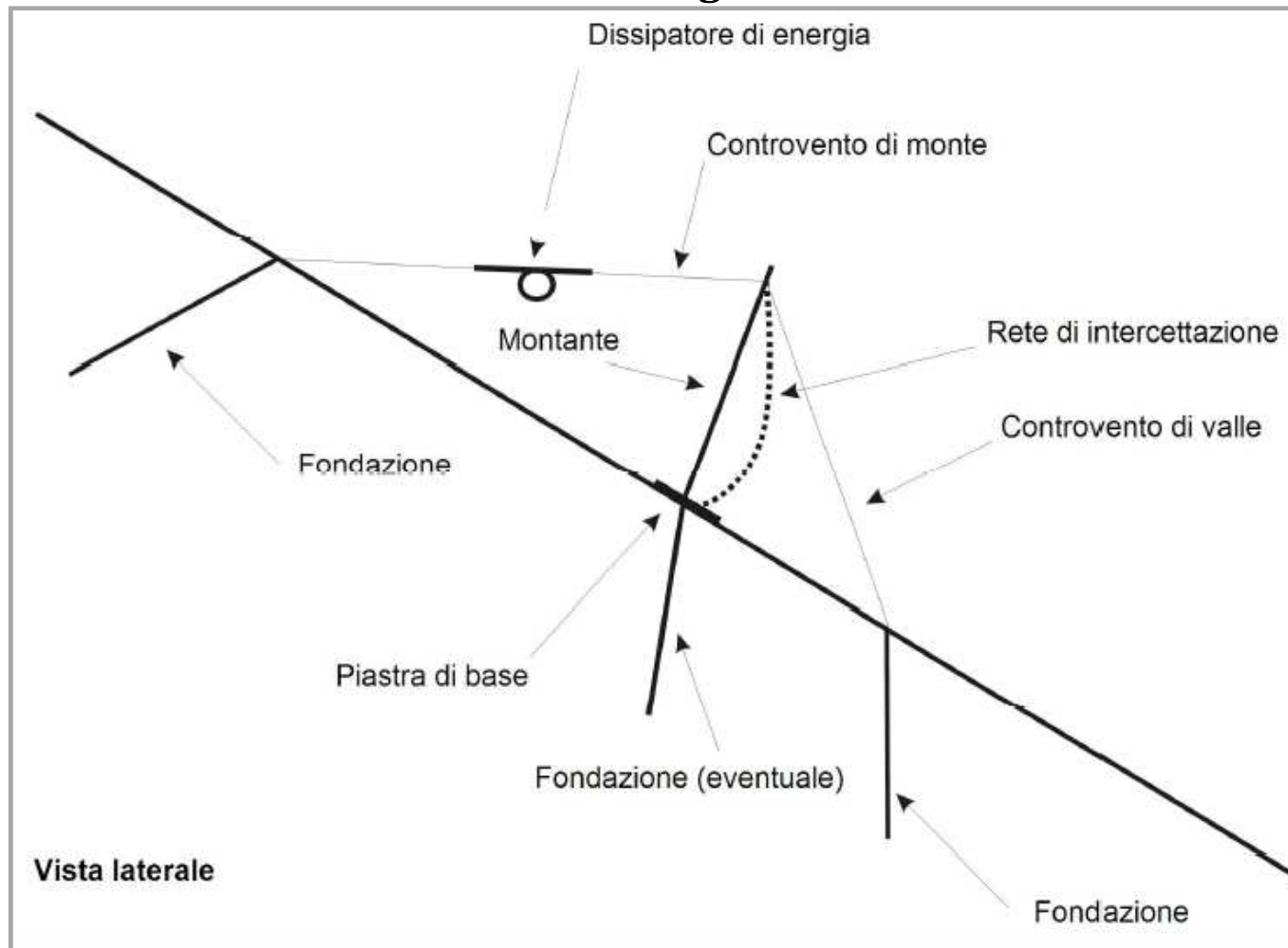
BARRIERE PARAMASSI : Classificazione Linee guida ETAG 027 e NORME UNI 11211-4

Parti principali	Composizione	Funzioni
Struttura di intercettazione	Rete principale: formata da cavi metallici, fili e/o barre di diverso tipo e materiale (per esempio reti di cavi	Sostenere l'impatto diretto del blocco, deformarsi in modo elastico e/o plastico, e
Parti principali	Composizione	Funzioni
Elementi di connessione	Funi di connessione, cavi d'acciaio, fili e/o barre di diverso tipo e materiale, raccordi, ganasce, dispositivi per la dissipazione dell'energia (elementi per la dissinazione dell'energia e/o per il	Trasmettere le tensioni alle struttura delle fondazioni durante l'impatto e/o mantenere le strutture di intercettazione in posizione.
Parti principali	Composizione	Funzioni
Struttura di supporto	Montanti di diversi materiali, geometrie e lunghezze (per esempio, tubi, elementi metallici strutturali) e potenzialmente provvisti di un perno nella alla base.	Mantenere eretta la struttura di intercettazione. Può essere collegata alla struttura di intercettazione in modo diretto o tramite gli
Parti principali	Composizione	Funzioni
Fondazioni	Non comprese in questo ETAG.	Trasferire a terra le sollecitazioni derivanti dall'impatto del blocco.



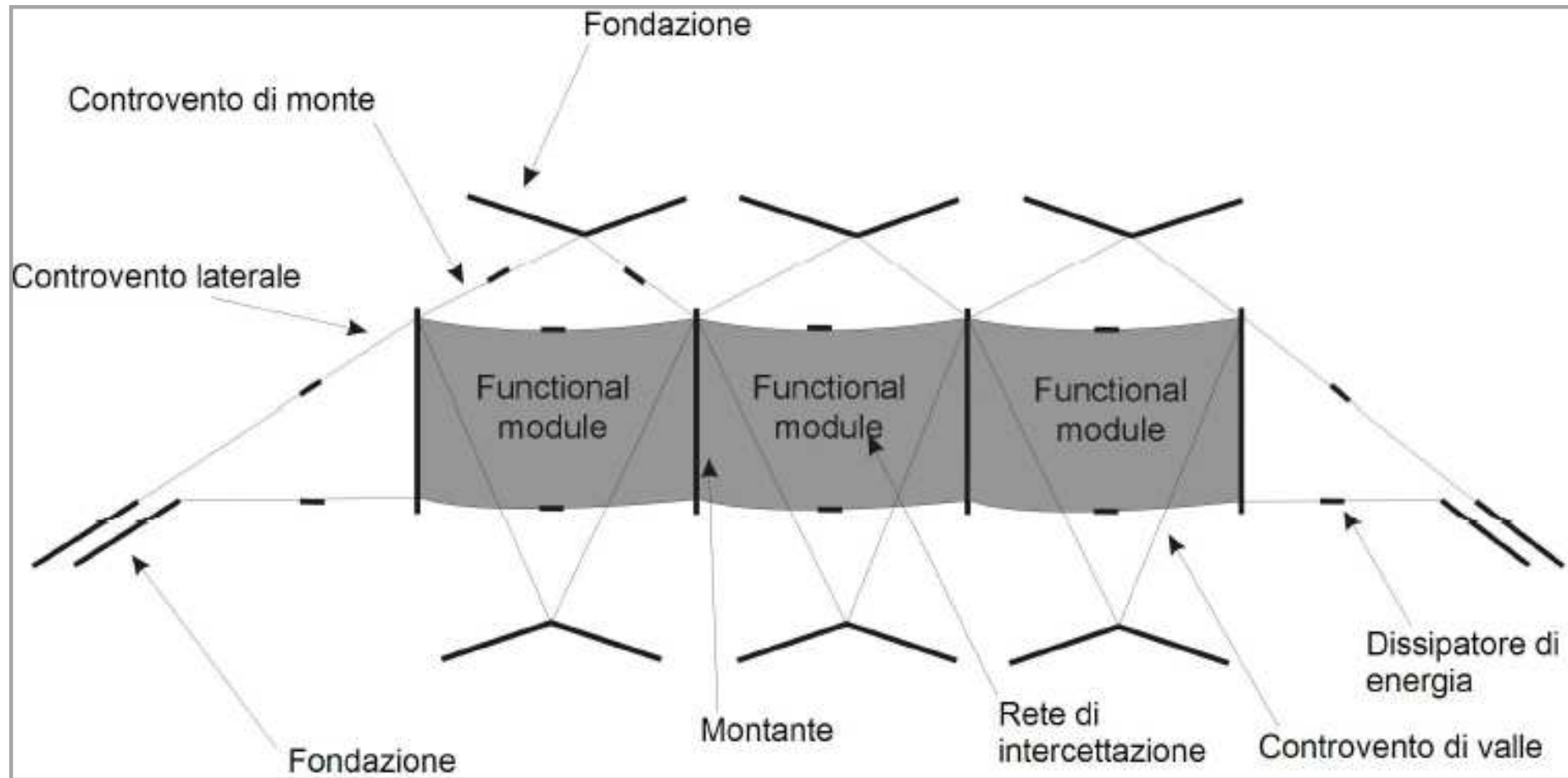
4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Classificazione Linee guida ETAG 027 e NORME UNI 11211-4



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Classificazione Linee guida ETAG 027 e NORME UNI 11211-4



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Classificazione Linee guida ETAG 027 e NORME UNI 11211-4

Il Livello di Energia di una barriera paramassi è definito come l'energia cinetica di un blocco omogeneo e regolare che impatta la rete della barriera considerata. E' quantificato in **SEL** (*Service Energy Level – Livello di Energia di Servizio*) e **MEL** (*Maximum Energy Level – Massimo Livello di Energia*).

I livelli considerati per SEL (in KJ) sono 85, 170, 330, 500, 660, 1000, 1500 e superiore a 1500
L'energia non deve essere inferiore rispetto ai valori riportati in tabella.

Classificazione delle barriere paramassi

Classificazione livello di energia	0	1	2	3	4	5	6	7	8
SEL	-	85	170	330	500	660	1000	1500	>1500
MEL •	100	250	500	1000	1500	2000	3000	4500	>4500



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Classificazione Linee guida ETAG 027 e NORME UNI 11211-4

Una barriera paramassi è composta da:

- a) una struttura di intercettazione, che ha la funzione di sostenere l'impatto diretto del blocco, deformandosi in modo elastico e/o plastico, e di trasmettere le tensioni alle strutture di connessione e di supporto e alle fondazioni;*
- b) una struttura di supporto, che ha la funzione di mantenere tesa la struttura di intercettazione, per sua natura non rigida. Può essere collegata alla struttura di intercettazione direttamente o attraverso una struttura di connessione.*
- c) elementi di connessione, che hanno la funzione di trasmettere le tensioni alle fondazioni. Per consentirne la deformazione possono essere installati meccanismi che permettano un allungamento graduale.*

Le fondazioni non sono considerate parte del kit ETAG 027. Il progetto delle fondazioni è responsabilità del progettista, che è tenuto ad attenersi alle disposizioni di legge nazionali.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : aspetti di modellazione, analisi e verifica:

La modellazione delle barriere paramassi può essere effettuata su due scale di modello:

1. Interazione della barriera (di varie tipologie) nelle analisi traiettografiche di simulazioni statistiche (analisi e verifica globale);
2. Interazione barriera – blocco impattante con modelli agli elementi finiti non lineari in grandi deformazioni o tramite analisi di schemi statici semplificati una volta note le forze in gioco (analisi e verifica locale della barriera in tutti suoi componenti fino alle fondazioni):

Nelle verifiche di tipo globale la barriera è modellata come un elemento in grado di assorbire un'energia massima (desunta dalle linee guida ETAG) con geometria semplificata rappresentata dalla massima altezza e inclinazione. Inoltre devono essere fatte le seguenti assunzioni in relazione alla modellazione del fenomeno d'impatto :

- a) *Barriera perfettamente anelastica: i coefficienti di restituzione normali e tangenziali k_N , k_T , sono pari a 0.0 con arresto del blocco;*
- b) *Barriera perfettamente elastica: i coefficienti di restituzione normali e tangenziali k_N , k_T , sono pari a 1.0 con rimbalzo all'indietro del blocco e successivo arresto;*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : aspetti di modellazione, analisi e verifica

c) *Barriera anelastica con massima energia dissipabile E_{MAX} . Si possono presentare due situazioni :*

- *il primo in cui $E_{BLOCCO} < E_{MAX}$: in questo caso la barriera arresta il blocco in fase elastica o elastoplastica in funzione del rapporto tra le energie in gioco. Si può avere un rimbalzo all'indietro nel caso di comportamento elastico, a quasi il completo arresto nel caso di comportamento plastico*
- *Il secondo in cui $E_{BLOCCO} > E_{MAX}$: in tale situazione la barriera sarà superata dal blocco che rallenterà il moto a spese dell'energia impegnata dalla struttura. Il blocco registrerà una perdita di energia tanto più elevata quando la differenza tra le energie in gioco è minima e potrà arrestarsi subito dopo.*

Le ipotesi di interazione blocco-barriera così formulate a livello globale devono tenere conto di due aspetti:

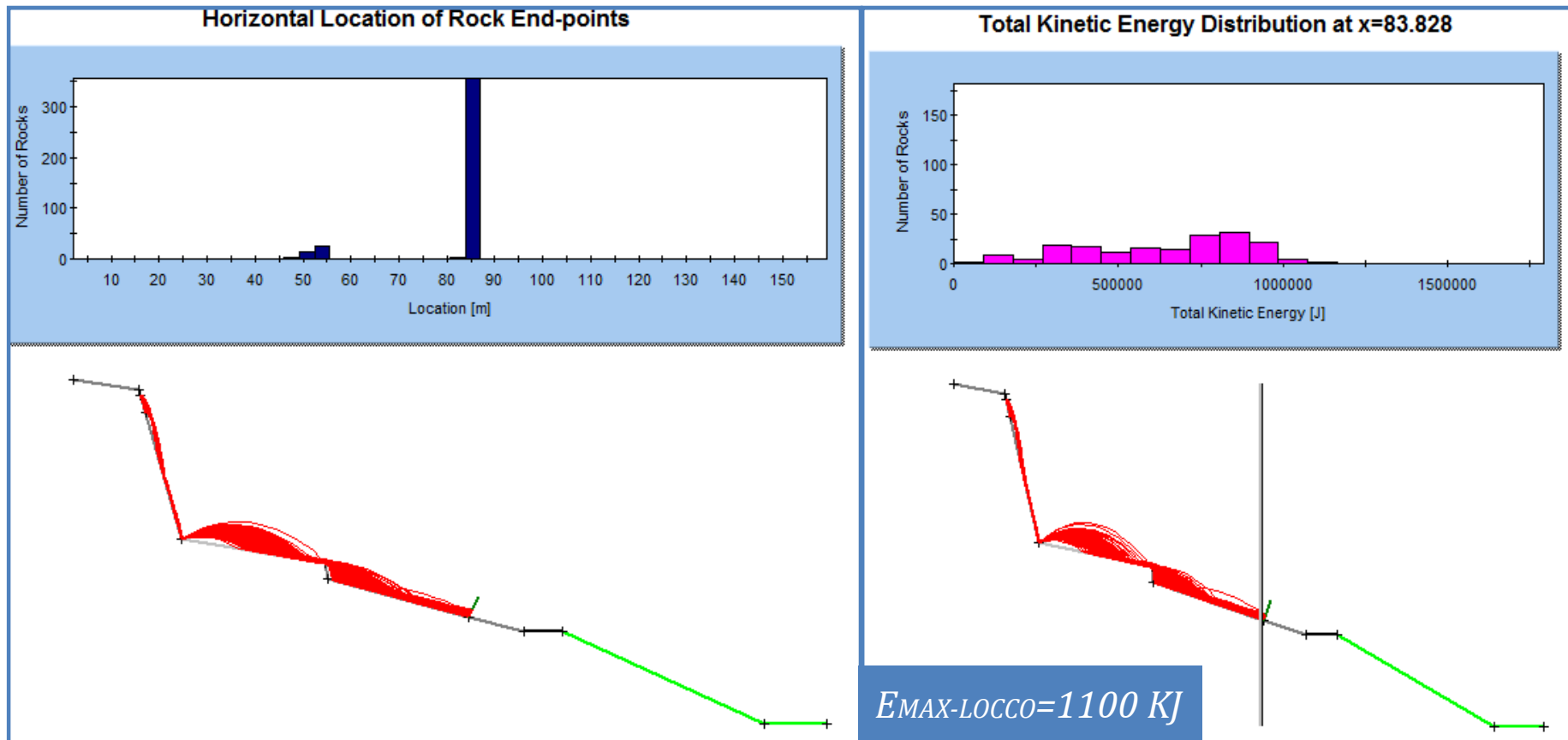
1. *Forte riduzione dell'energia dissipabile E_{MAX} nel caso di impatto sui montanti della barriera o in prossimità di essi;*
2. *Inefficacia della barriera nel caso di impatti sulla parte sommitale delimitata da un franco minimo e superamento cinematico.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : esempi di verifica

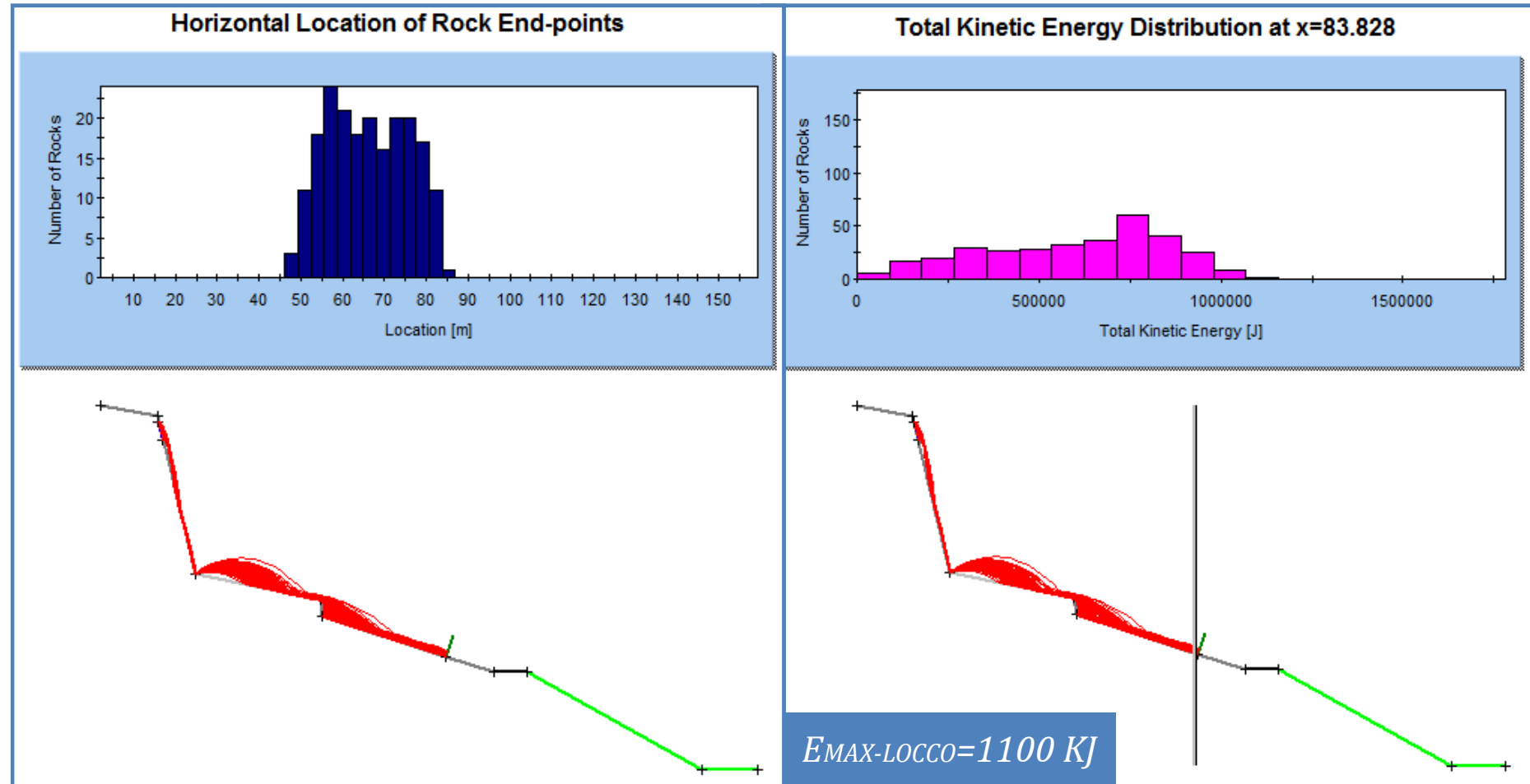
Caso 1: Barriera completamente anelastica – tutti i blocchi intercettati sono stati arrestati



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : esempi di verifica

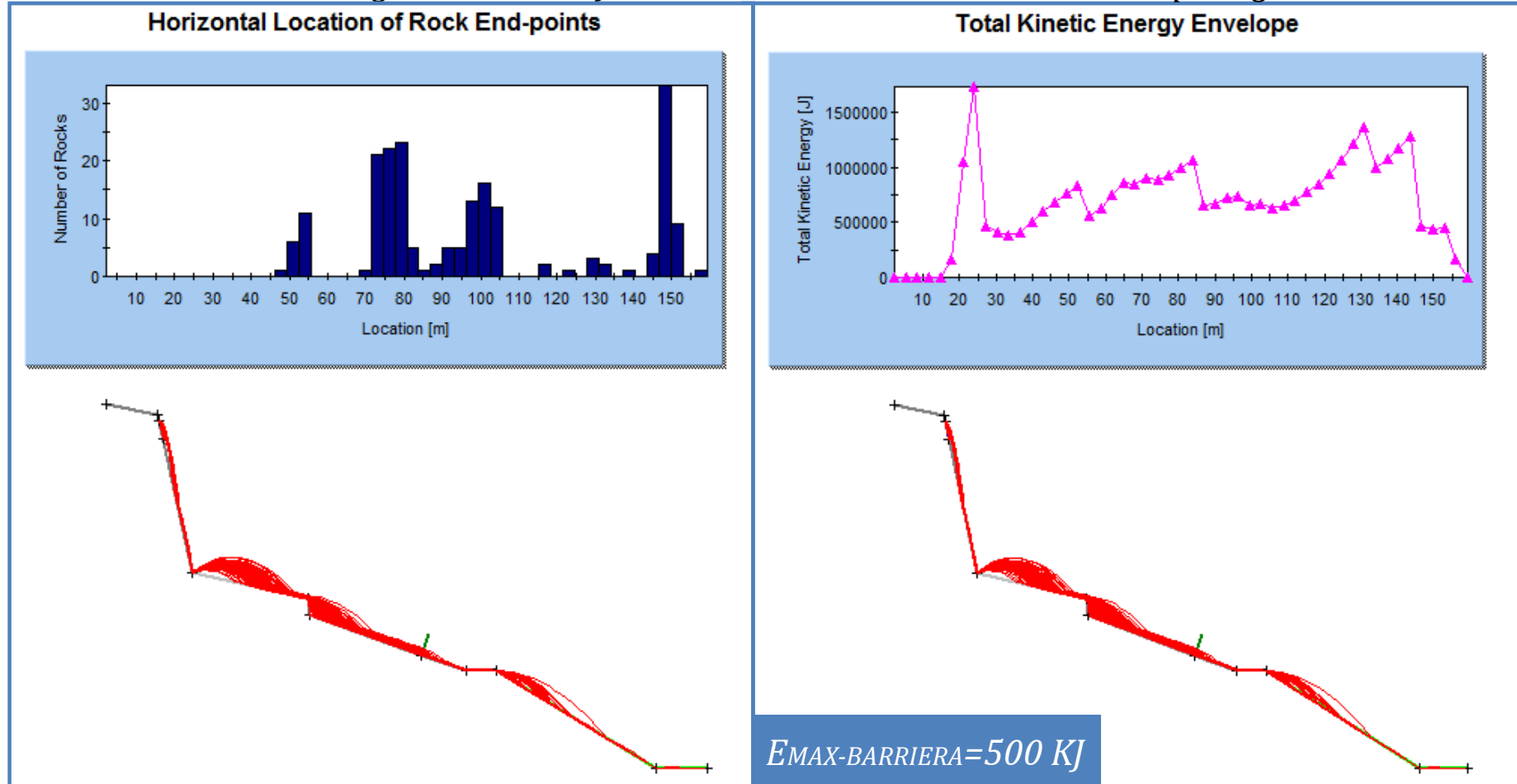
Caso 2: Barriera completamente elastica – tutti i blocchi intercettati sono rimbalzati e arrestati



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : esempi di verifica

Caso 3: Barriera con energia $E_{MAX}=500$ KJ– blocchi intercettati con $E_{BLOCCO}>E_{MAX}$ proseguono



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Modellazione FEM – Verifica locale componenti e globale

Le analisi di dettaglio con il metodo agli elementi finiti sui componenti della barriera e sulla risposta globale ad azioni di impatto di tipo impulsivo (blocchi in caduta) è sicuramente il metodo di verifica più affidabile in quando non è necessario fare ipotesi troppo cautelative sull'urto di progetto e sulla distribuzione delle azioni sui singoli componenti. Affinché i metodi FEM dia risultati affidabili è necessario che siano rispettate alcune ipotesi fondamentali:

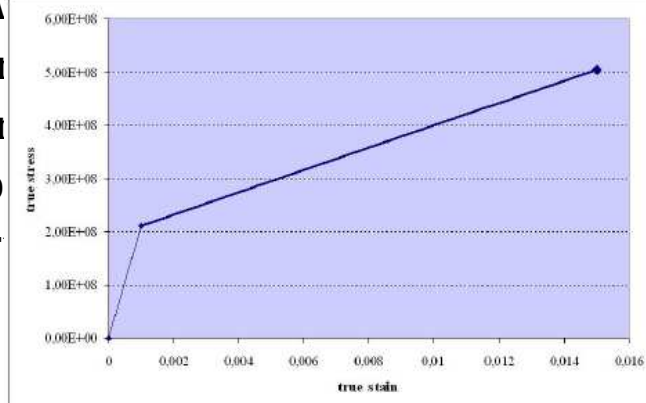
- *Discretizzazione dei componenti della struttura con elementi finiti appropriati tipo la rete, i montanti, controventi, dissipatori, funi etc con legami lineari e non per materiale e geometria;*
- *Legami costitutivi degli elementi appropriati alle tipologie di materiale utilizzato, elastico lineare, elastico non lineare, elastoplastico perfetto o incrudente;*
- *Applicazione dell'analisi dinamica non lineare in grandi deformazioni della barriera soggetta all'azione impulsiva dell'urto di progetto. Si fa l'ipotesi di grandi spostamenti e deformazioni in quanto le risultanze sperimentali hanno riscontrato spostamenti della rete di intercettazioni paragonabili all'altezza della barriera (comprese tra i 4-5 mt).*



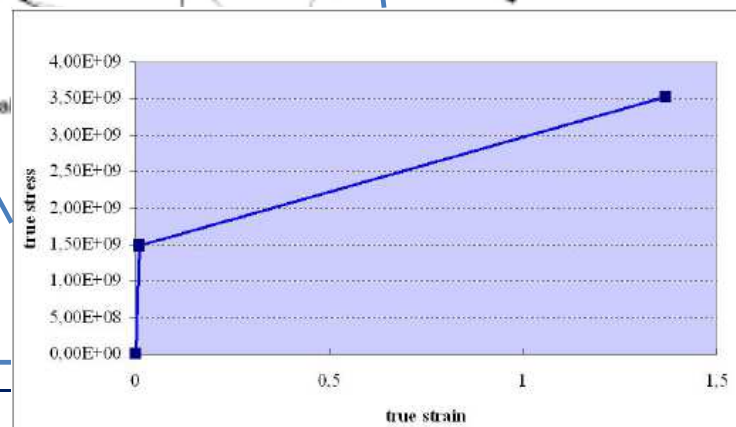
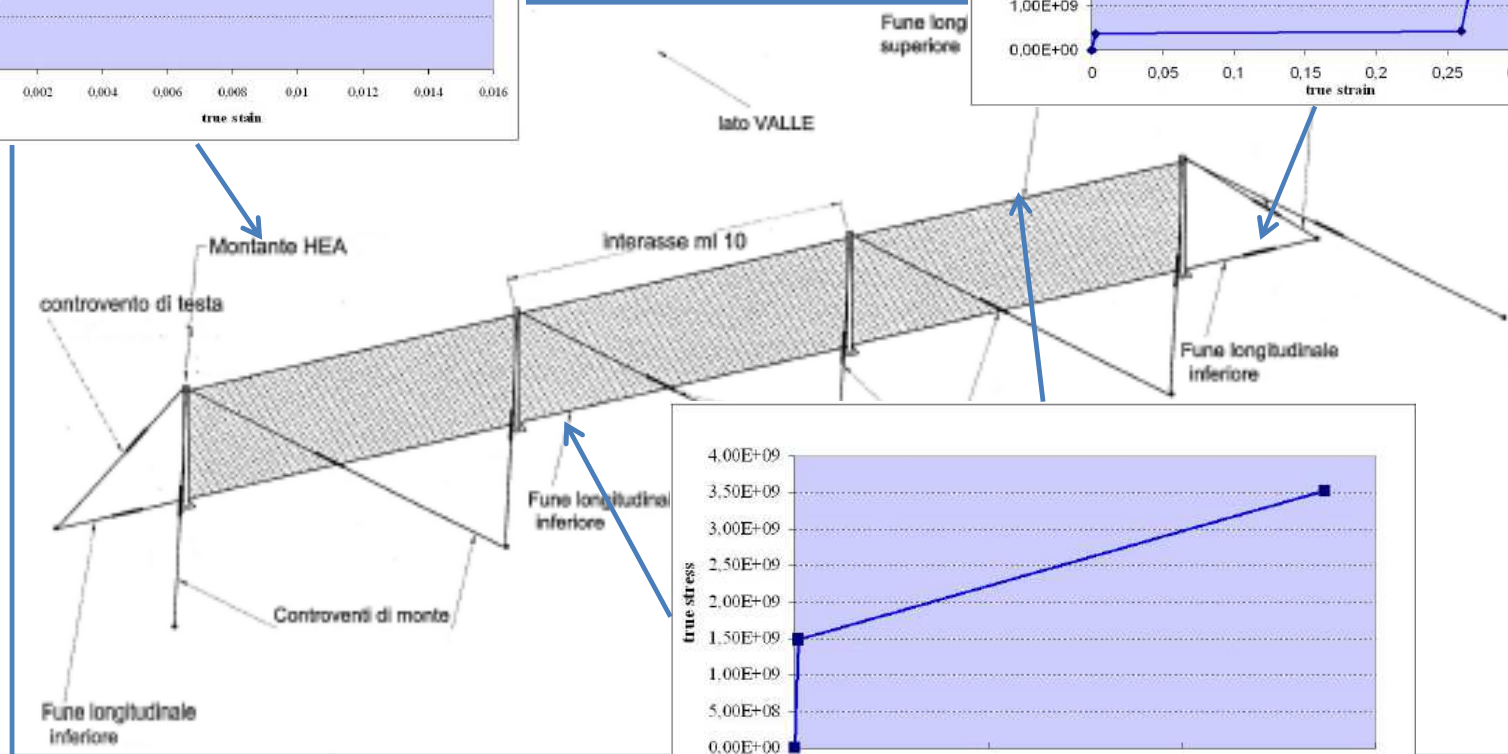
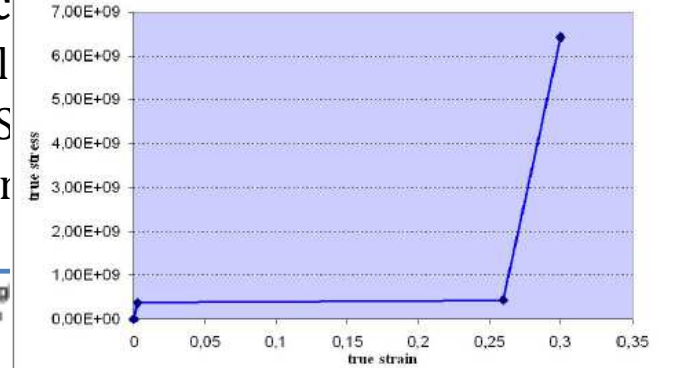
4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI

Per
bar
rip
str



one FEM – Verifica loc
isi non lineare impul
i prova sperimentali. S
nuti ma bensì il compor
i montanti.



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

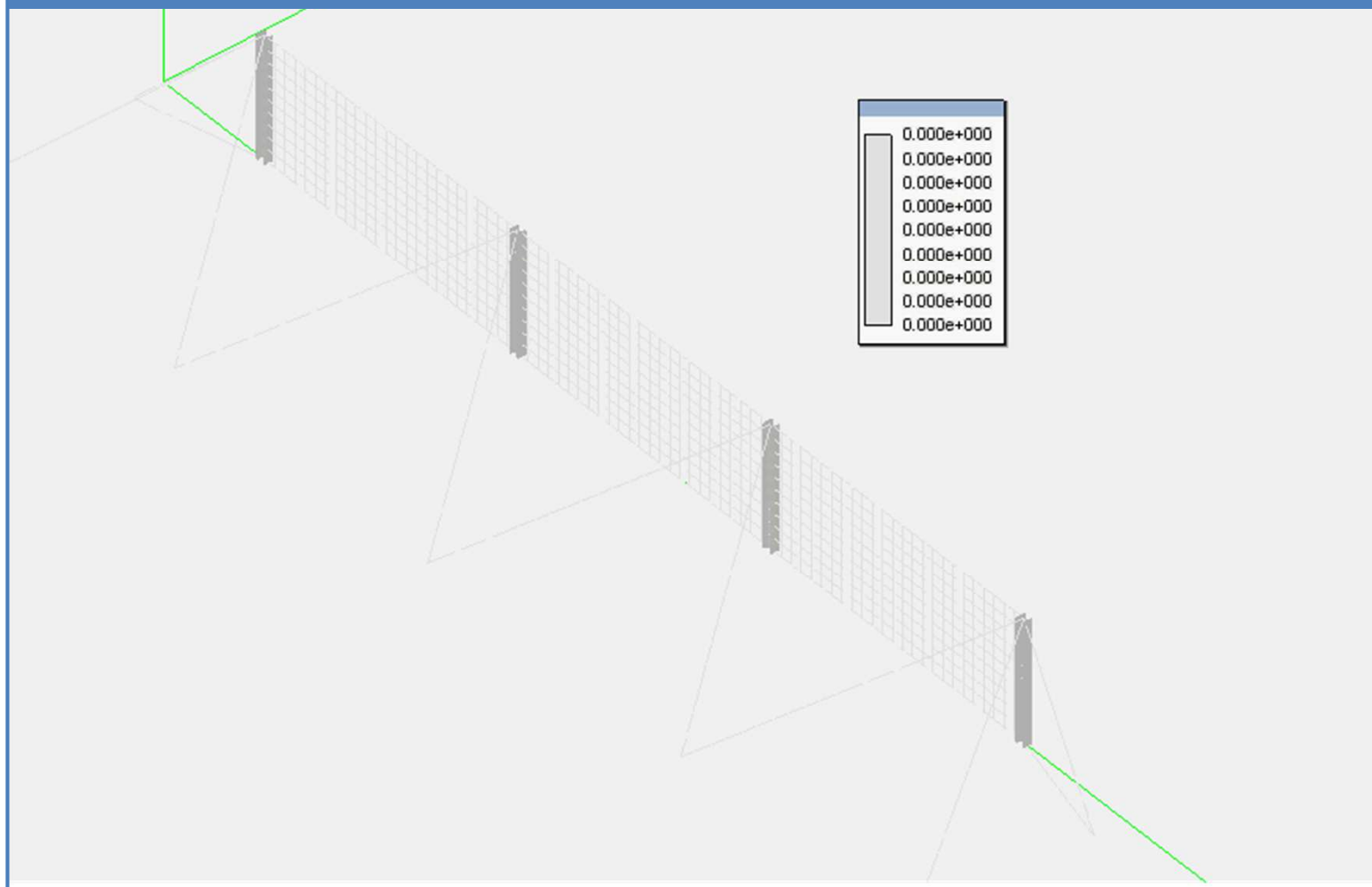
CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 81

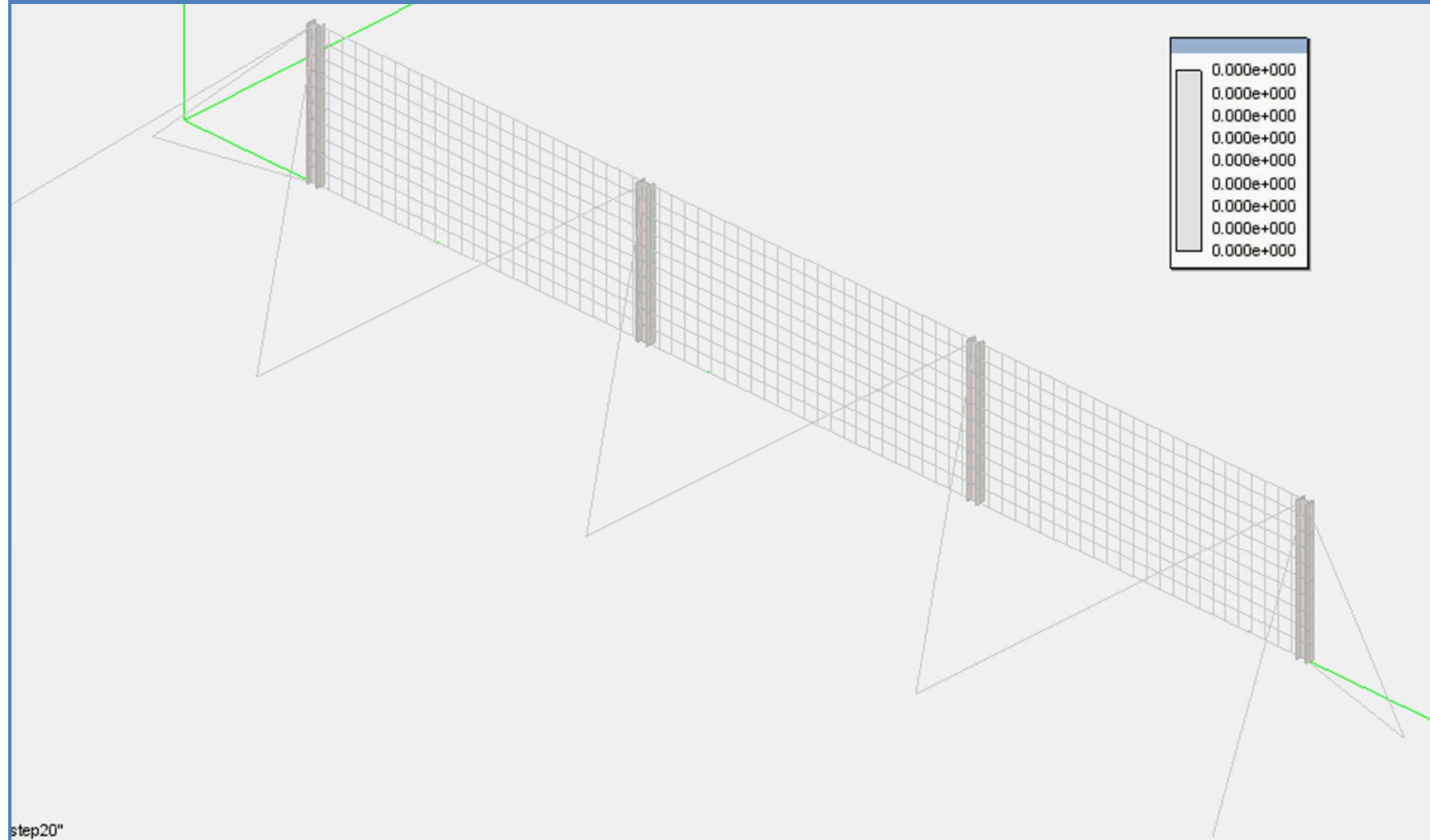
4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Modellazione FEM – Isospostamenti impatto campata



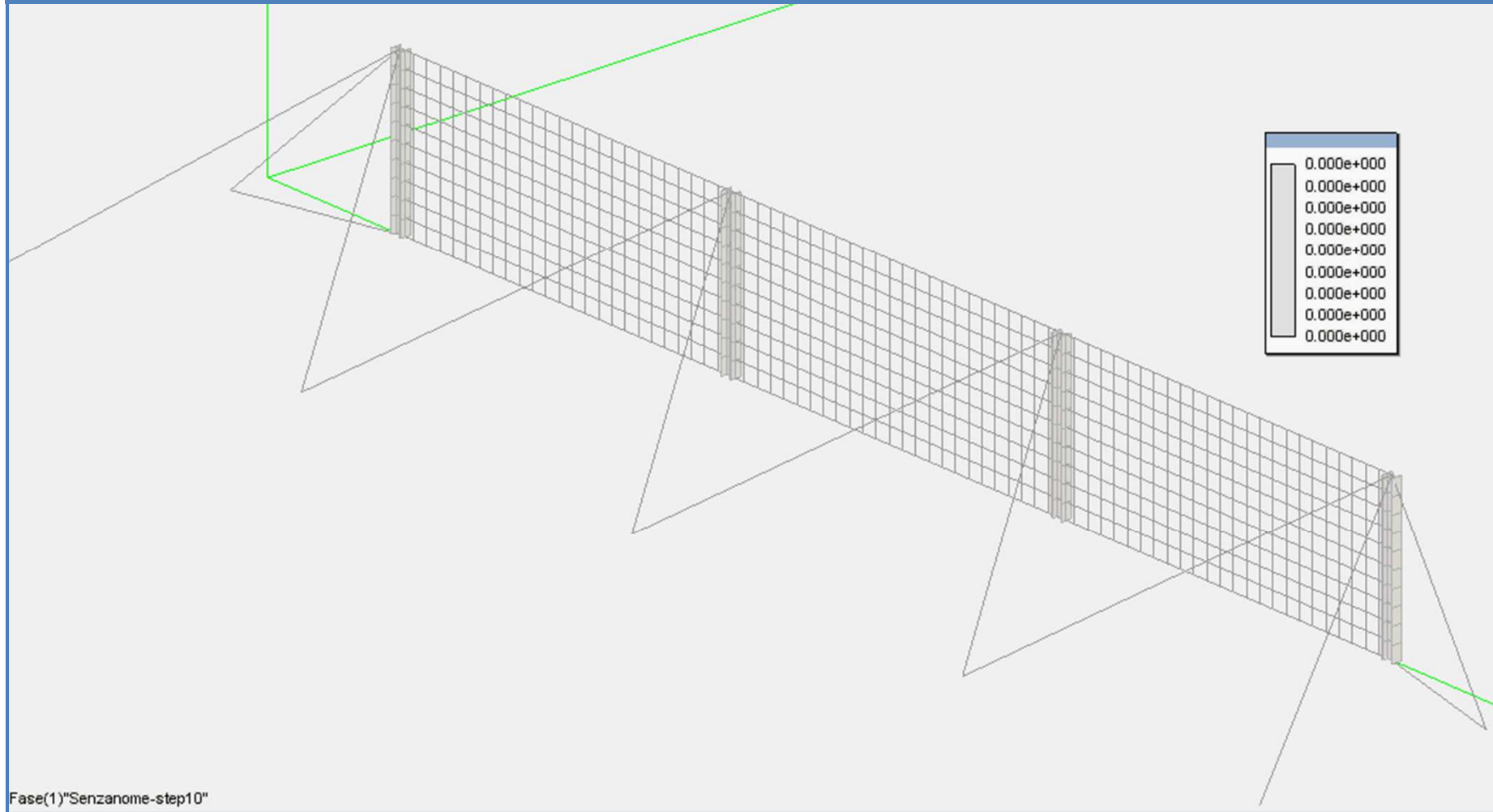
4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Modellazione FEM – Stato plastico impatto campata



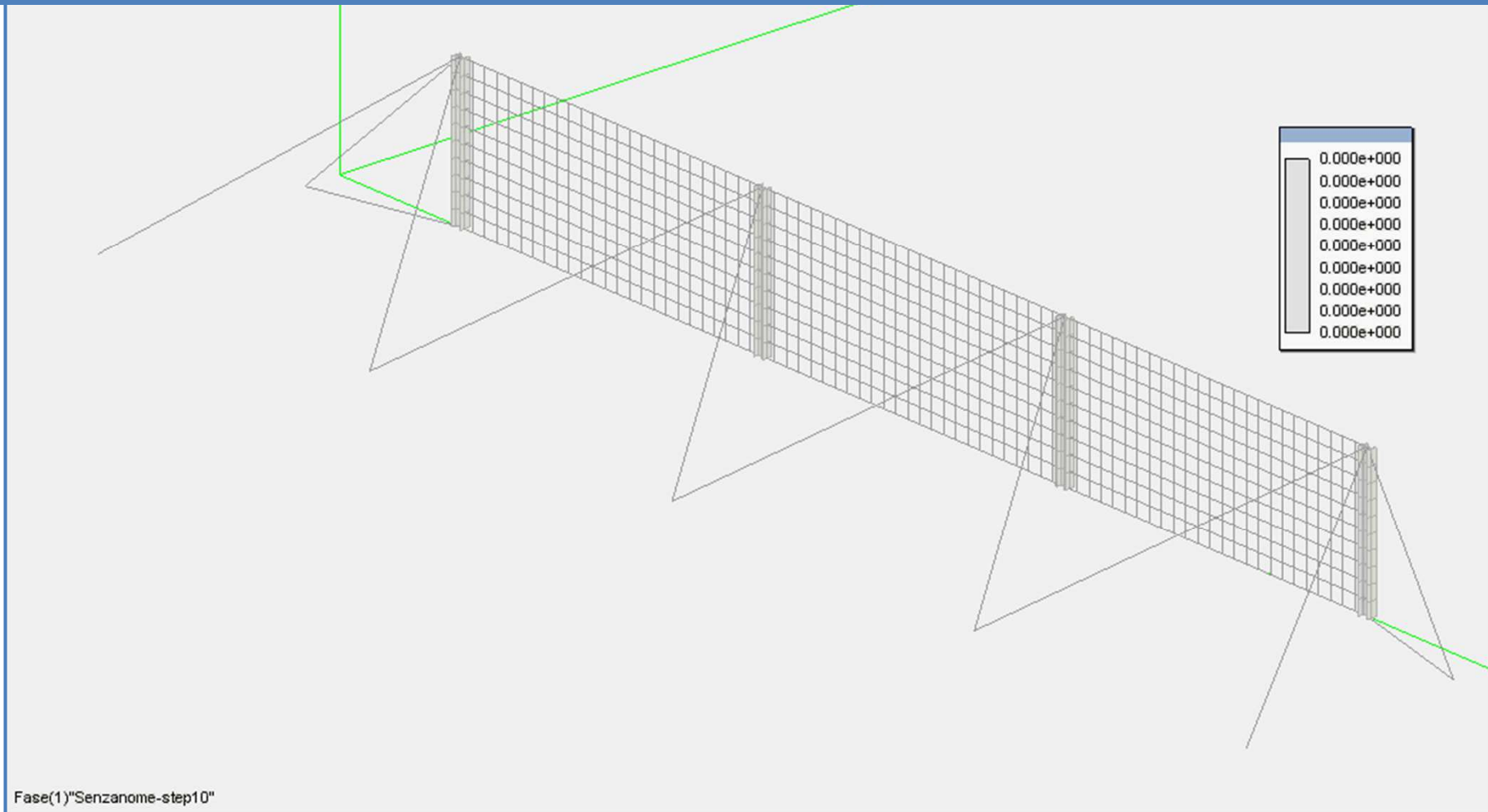
4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Modellazione FEM – Isopostamenti impatto montante



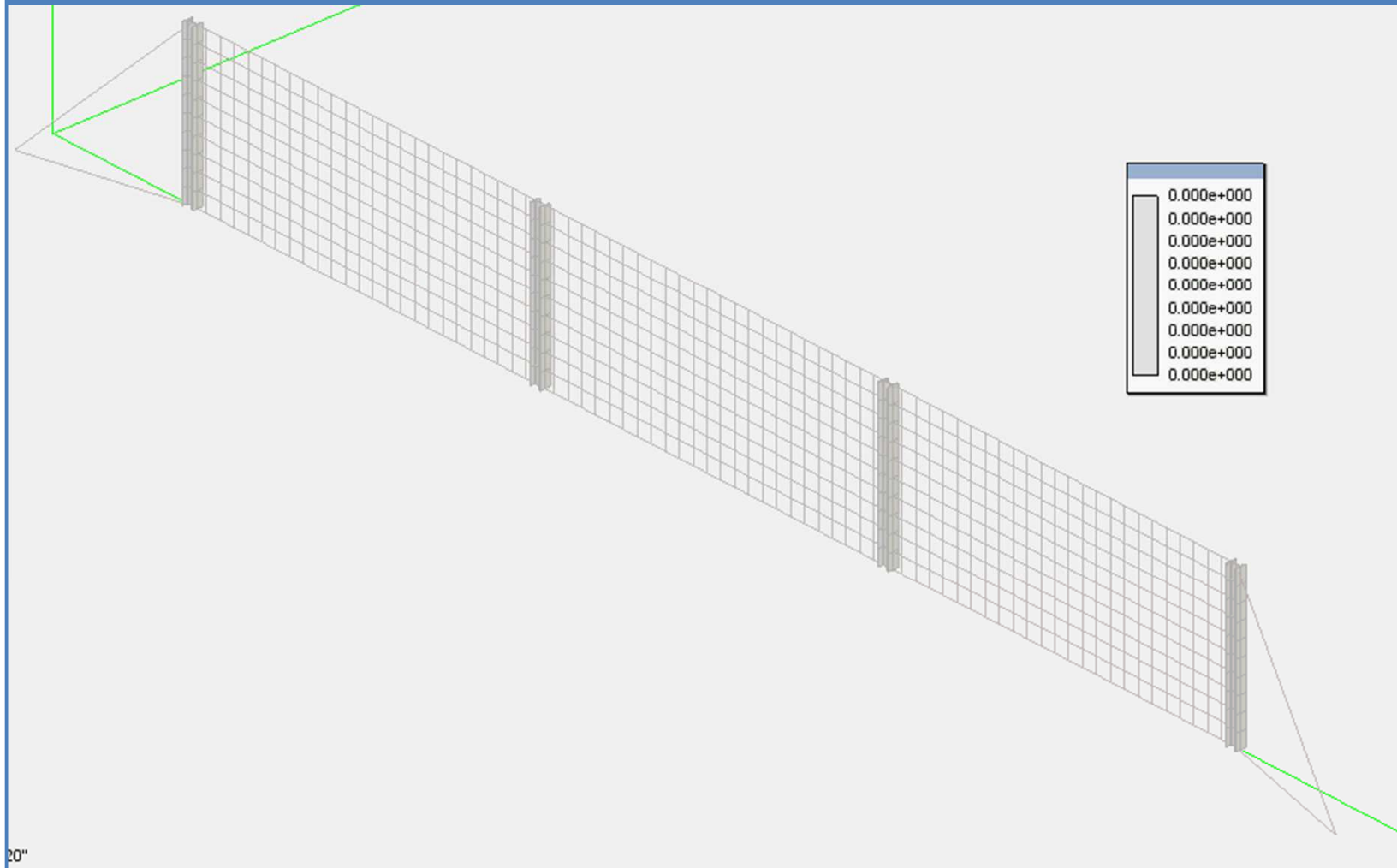
4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI : Modellazione FEM – Stato plastico impatto montante



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*

BARRIERE PARAMASSI TIP. 2 : Modellazione FEM – Isopostamenti impatto campata



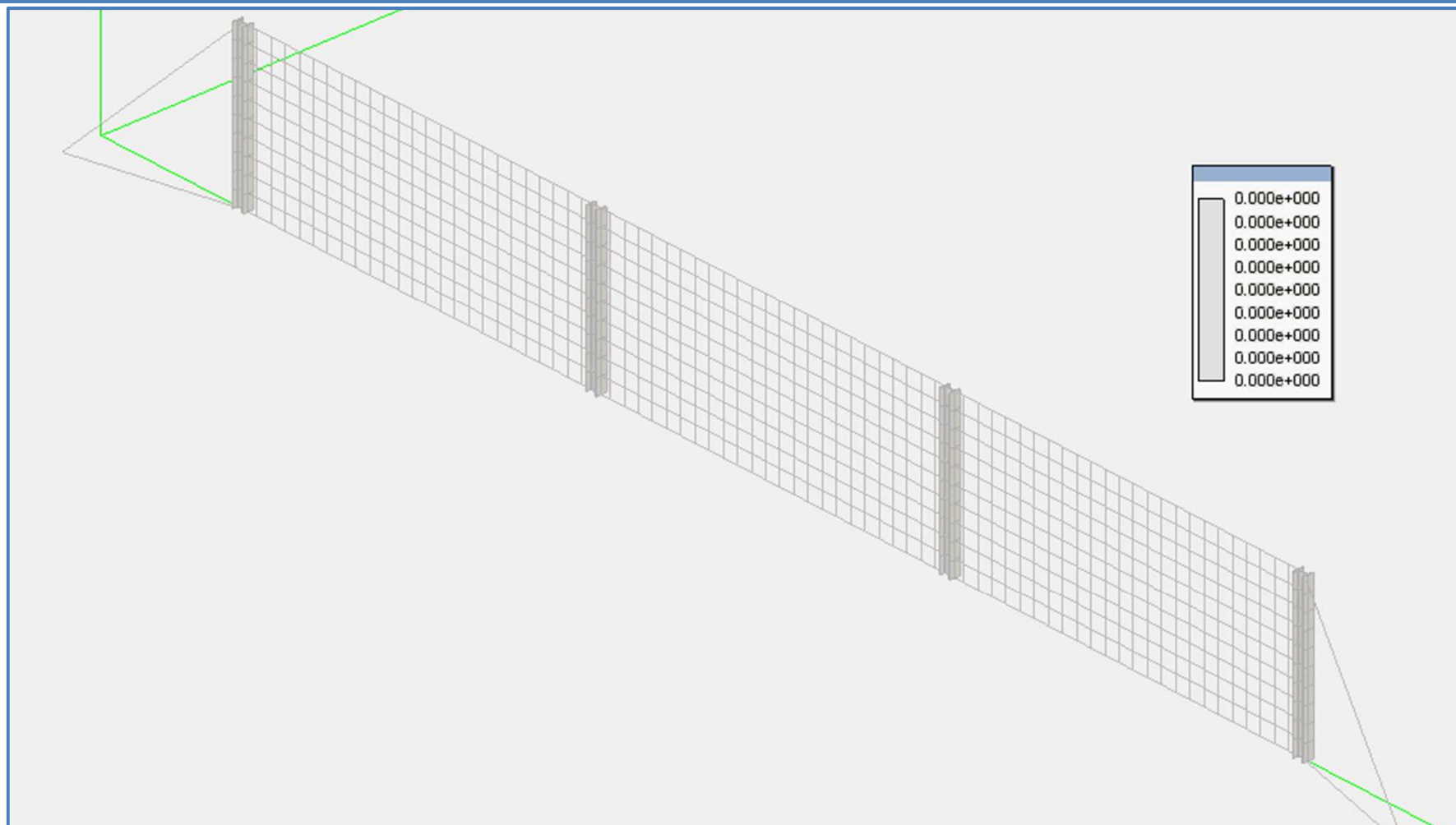
Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 86

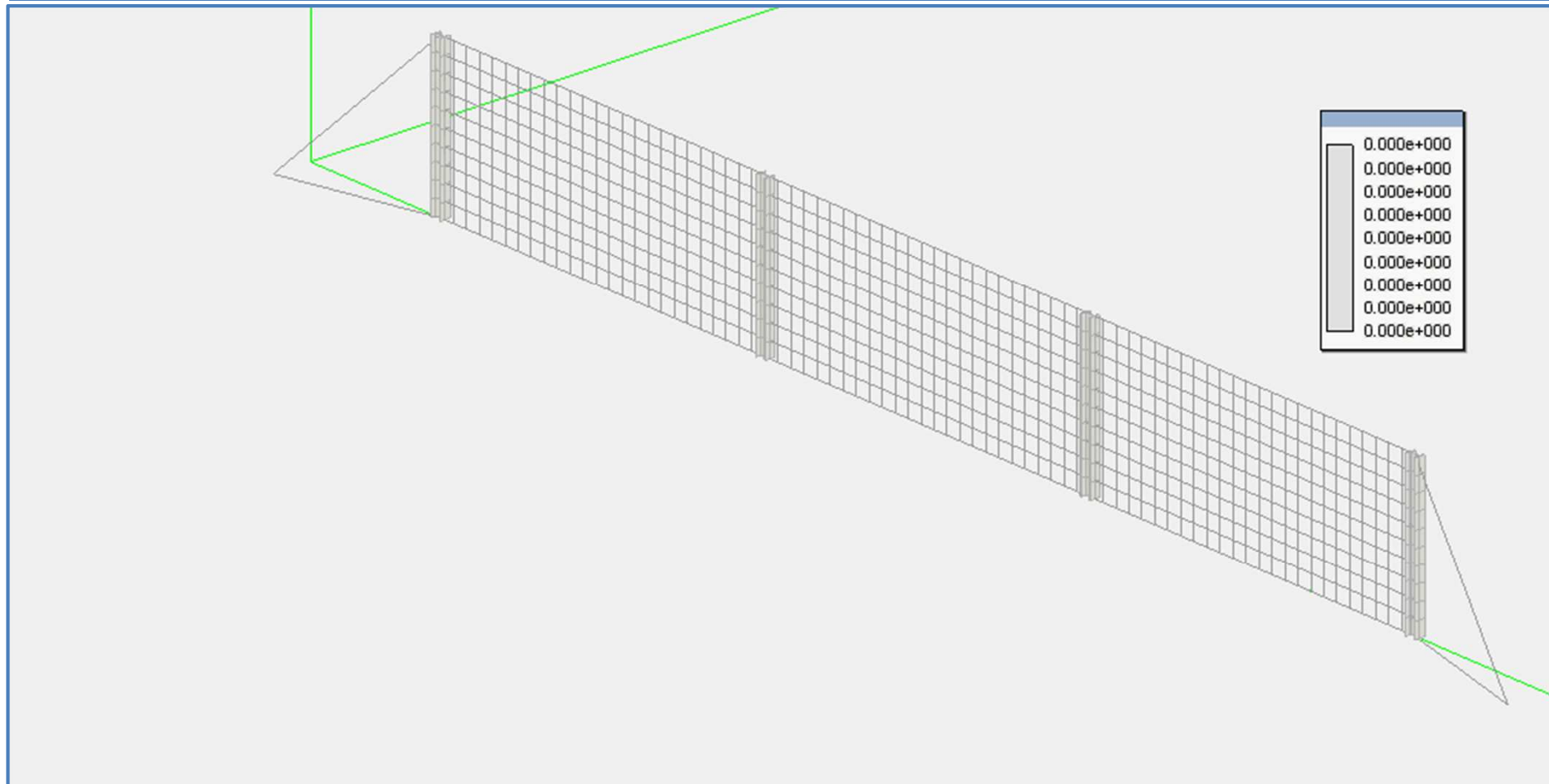
4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.*



BARRIERE PARAMASSI TIP. 2 : Modellazione FEM – Stato plastico impatto campata



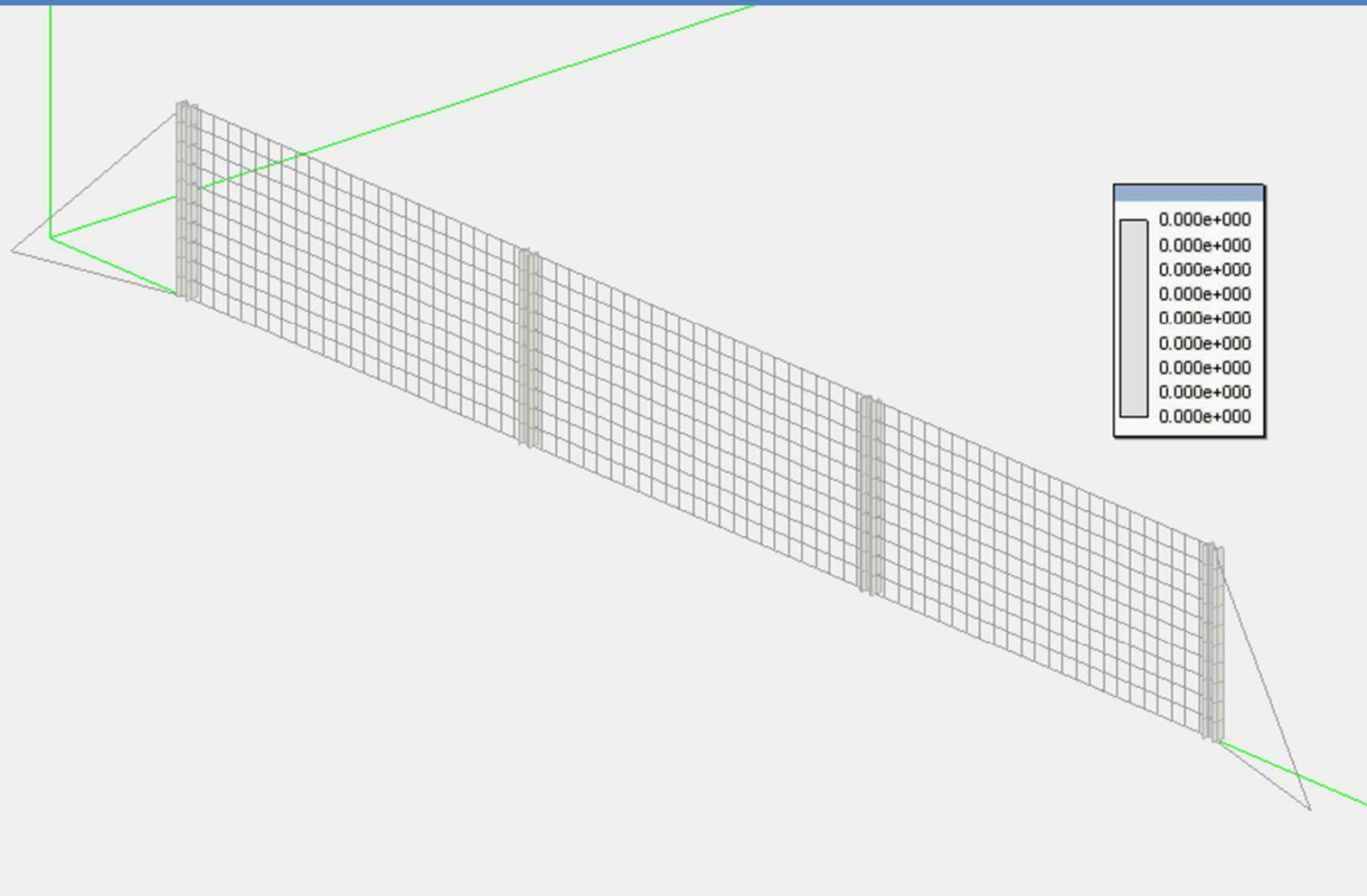
4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.**



BARRIERE PARAMASSI TIP. 2 : Modellazione FEM – Isopostamenti impatto montante



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Interazione con opere passive: Rilevati, barriere, gallerie paramassi e fossati di raccolta.**



BARRIERE PARAMASSI TIP. 2 : Modellazione FEM – Stato plastico impatto montante



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.***

I modelli matematici utilizzabili per la previsione del moto di caduta massi descrivono il comportamento di un singolo blocco che si muove lungo il versante

La validità di un modello, dipende :

1. Sia dal modo in cui i diversi fenomeni fisici che si verificano durante il moto (caduta libera, impatto, rottura con generazioni di frammenti, rimbalzo, rotolamento e scivolamento) sono individuati e descritti in termini matematici;
2. sia dall'affidabilità dei parametri scelti per i modelli.

La validità di un modello si effettua confrontando **le simulazioni in scala reale (prove in sito) con quelle numeriche svolte con il modello stesso.**

Le finalità che si propone un modello matematico sono quelle di determinare:

- Possibili percorsi di caduta lungo il versante;
- Altezze delle traiettorie di caduta rispetto alla superficie del pendio, velocità ed energie assunte dai blocchi lungo la traiettoria;
- Massime distanze raggiunte dai massi e zone d'espandimento a valle;



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.**

Modellazioni tridimensionali richiedono al modello di descrivere la topografia completa della superficie del pendio, spesso è svolta quando il fenomeno si è già realizzato e i blocchi staccati hanno realizzato una vera e propria pista. In tal caso i blocchi che si staccheranno in fasi successive con buona probabilità la seguiranno. In questo caso la descrizione della topografia del pendio è meno onerosa poiché riguarda solo la pista creata dai blocchi.

Il problema tridimensionale (fig.43) viene nella maggior parte dei casi ricondotto con buon'approssimazione a piano, ciò si traduce innanzi tutto nella scelta della sezione verticale che accoglie tutti i percorsi di caduta. Nel caso in cui il problema è trattato piano, si possono fare delle correzioni per tener conto del fatto che i blocchi seguono il percorso che soddisfa la massima efficienza del moto, cambiando la direzione dei movimenti di caduta e rimbalzo in accordo con l'inclinazione locale del pendio o alle caratteristiche del materiale che costituiscono il pendio



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

Tale correzione comporta che:

- *I percorsi di caduta massi sono stabiliti a priori sulla planimetria del pendio in cui si sviluppano tenendo conto della posizione dei massi instabili, della morfologia del pendio della forma del masso etc;*
- *I percorsi e le traiettorie di caduta sono approssimati in planimetria con spezzate a tratti rettilinei. Ciascun tratto di spezzata nello spazio tridimensionale è contenuto in un piano verticale;*
- *La cinematica del moto del baricentro dei massi viene studiata in un piano verticale, ottenuto sviluppando mediante rotazione i piani verticali contenenti i singoli tratti di spezzata;*

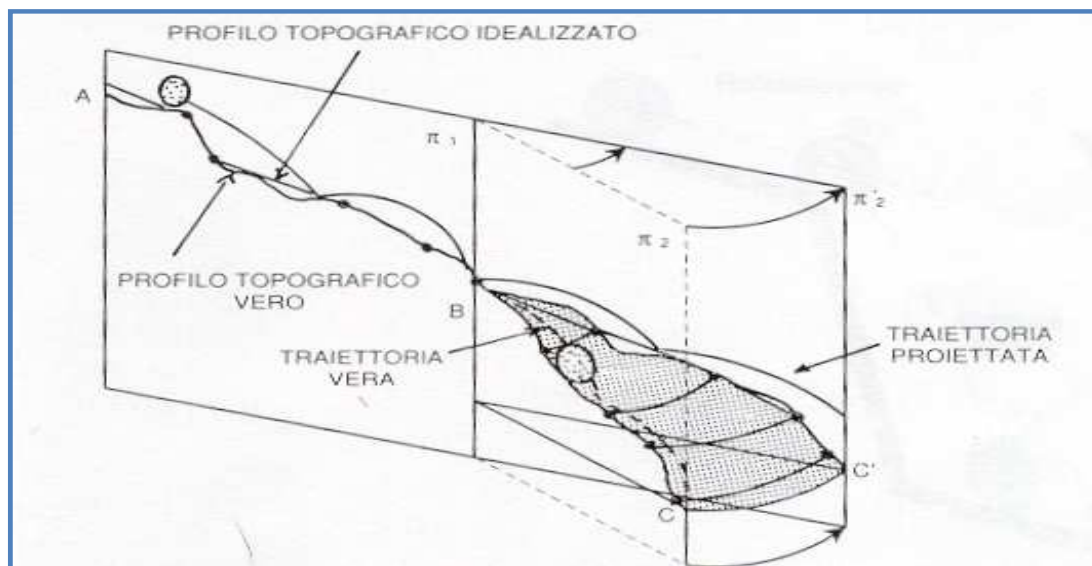


Fig.37: Traiettoria reale e sua proiezione su un piano verticale (da Bozzolo e Pamini 1986)



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.***

Per effettuare una modellazione matematica corretta è necessario evidenziare quali sono gli aspetti di un fenomeno di caduta massi. L'analisi sperimentale permette di individuare un'alternanza continua di fenomenologie distinte ciascuna con peculiari caratteristiche del moto (Giani, 1988):

- *Caduta libera;*
- *Urto e rimbalzo del blocco sulla superficie del pendio;*
- *Rotolamento;*
- *Scivolamento;*

Un modello per simulare in modo affidabile fenomeni di caduta massi deve essere in grado di descrivere con sufficiente approssimazione i quattro tipi di moto associati alle rispettive fasi. I più importanti problemi che riguardano la modellazione sono:

- *La scelta delle condizioni che determinano il passaggio da un tipo di moto ad un altro;*
- *La descrizione del comportamento del blocco durante l'impatto;*
- *La rottura del blocco in più frammenti;*

Può essere possibile che il passaggio da movimento ad un altro non avviene istantaneamente, potendo coesistere due moti simultaneamente (esempio rotolamento e scivolamento).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

I modelli di calcolo noti in letteratura si differenziano per il modo in cui sono schematizzati:

- *La geometria del blocco;*
- *La morfologia del versante;*
- *Il fenomeno d'impatto e le condizioni di transizioni tra tipi di movimento;*

Tali modelli si suddividono in tre grandi categorie:

- *Metodi analitici;*
- *Metodi numerici;*
- *Metodi empirici;*

A loro volta i modelli analitici si suddividono in:

- **Modelli Lumped Mass:** *il blocco è assimilato come punto materiale coincidente con il suo centro in cui è concentrata la massa (Piteau, 1977 ; Hungr & Evans, 1988 ; Scioldo, 1990);*
- **Modelli di corpo rigido:** *il blocco è schematizzato come corpo rigido durante tutte le fasi del moto, la cui dinamica è studiata integrando le equazioni del moto dei corpi rigidi (Falcetta, 1985 ; Descouders & Zimmermann, 1987);*
- **Modelli ibridi :** *il blocco è schematizzato come corpo rigido o come punto materiale con caratteristiche differenziate, a seconda della fase del moto che si considera (Bozzolo & Pamini , 1986; Azzoni, 1985 ; Pfeiffer & Bowen, 1989, Falcetta, 1984,etc.);*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

I metodi che considerano il blocco come punto materiale dotato di massa m e velocità v sono definiti **LUMPED MASS**. Le ipotesi fondamentali di tali metodi sono:

- *Il blocco è considerato come punto materiale dotato di sola massa concentrata nel centro di massa del blocco (trascurando il moto attorno al centro di massa);*
- *Il punto in aria si muove secondo una traiettoria balistica (traiettoria parabolica) e la resistenza all'aria è trascurata;*
- *Il fenomeno d'impatto è studiato con riferimento al principio di conservazione della quantità di moto tramite i coefficienti di restituzione (semplice, normale e tangenziale);*
- *Il fenomeno di rotolamento e scivolamento viene studiato con riferimento a corpi di forma assegnata (sferica, cilindrica etc.) trascurando il moto di rotazione del corpo, in presenza di attrito al rotolamento e allo scivolamento;*

Modellazioni di tale tipo si differenziano in base alle condizioni di transizioni tra tipi di movimento, alla presenza o meno di tutti i tipi di moto, moto bidimensionale o tridimensionale (Scioldo, 1990).



4. PENDII IN ROCCIA : Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.**

Si riportano le espressioni analitiche che modellano ogni fase del moto:

Fase iniziale del moto: la fase iniziale del moto consiste nell'assegnare le condizioni iniziali del moto ed il tipo di cinematismo iniziale.

- Punto di distacco (x_0, y_0);
- Condizioni cinematiche iniziali (v_0);
- Tipo di cinematismo iniziale (scivolamento, caduta libera, traiettoria, rotolamento ossia α);

Fase di scivolamento: la fase di scivolamento viene modellata con riferimento ad un corpo rigido che scivola lungo un piano inclinato in presenza di attrito dinamico allo scivolamento. Le grandezze cinematiche del moto sono rappresentate in fig.38

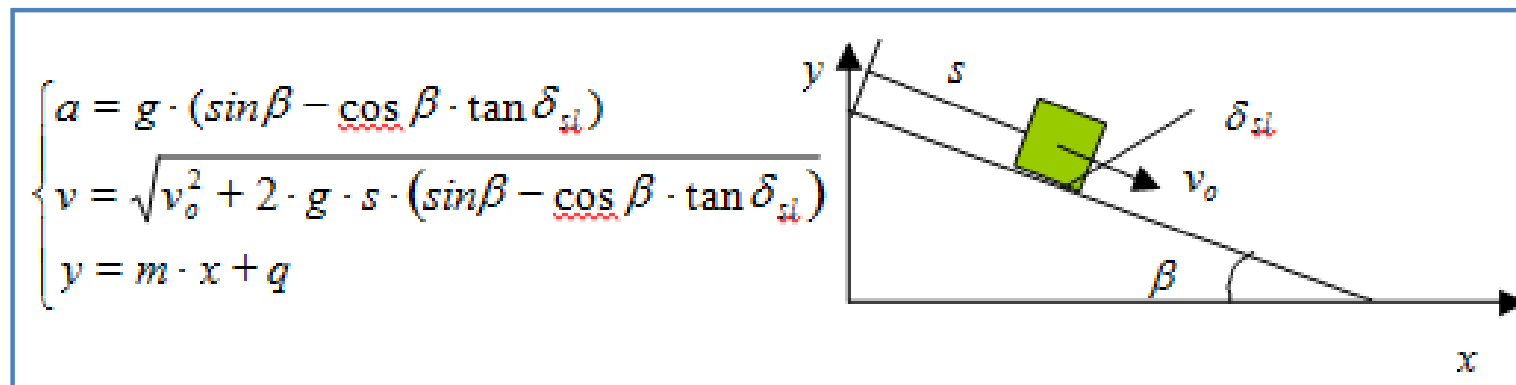


Fig.38: grandezze cinematiche del blocco durante la fase di scivolamento secondo lo sliding rock block model



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

Fase di rotolamento: la fase di rotolamento è modellata facendo riferimento ad un criterio di rotolamento convenzionale dedotto dalla cinematica rotazionale del corpo rigido. Le grandezze cinematiche del moto sono rappresentate in fig.45.

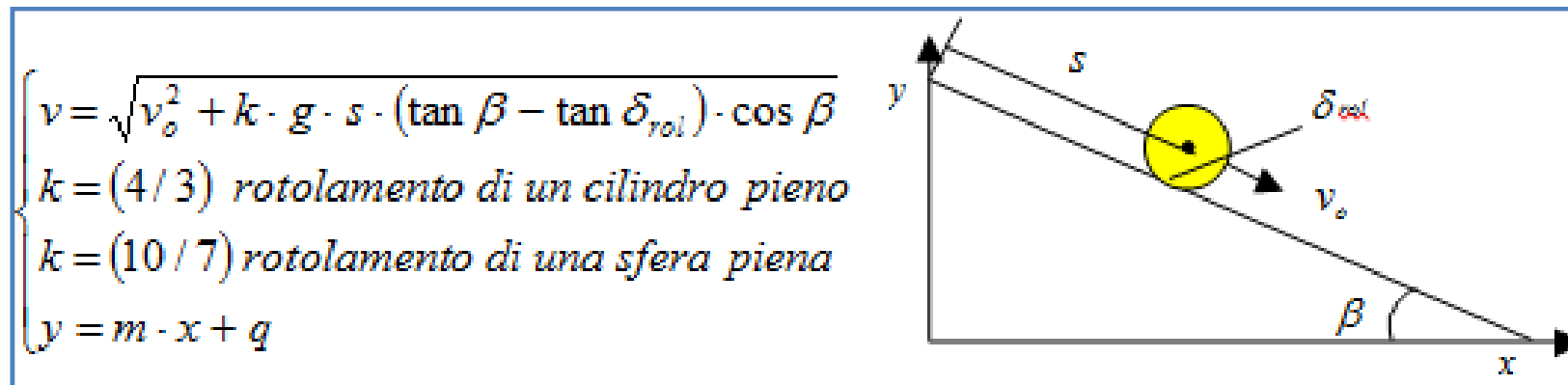


Fig.39: grandezze cinematiche del blocco durante la fase di rotolamento

Fase di caduta libera: la fase di caduta libera è modellata facendo riferimento alla caduta di un grave nel vuoto trascurando dunque la resistenza dell'aria (traiettoria parabolica) e facendo riferimento al solo moto del centro di massa del blocco. Le grandezze cinematiche del moto sono rappresentate in fig.39.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

Fase di caduta libera: la fase di caduta libera è modellata facendo riferimento alla caduta di un grave nel vuoto trascurando dunque la resistenza dell'aria (traiettoria parabolica) e facendo riferimento al solo moto del centro di massa del blocco. Le grandezze cinematiche del moto sono rappresentate in fig. 40.

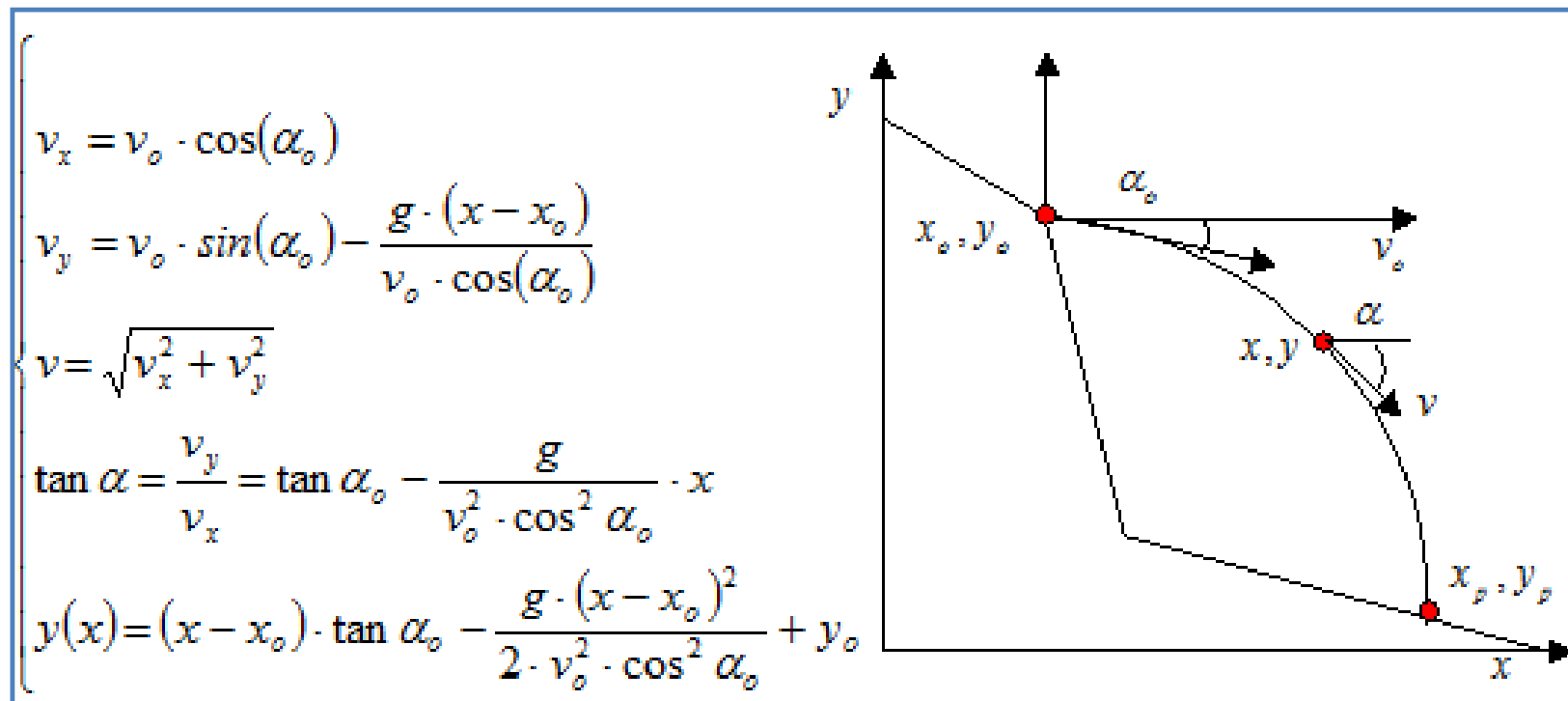


Fig.40: grandezze cinematiche del blocco durante la fase di rotolamento



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

Fase d'impatto e rimbalzo: il fenomeno d'impatto con tale metodologia è studiato facendo riferimento ai principi di conservazione della quantità di moto tramite i coefficienti di restituzione dell'energia semplice k oppure nelle sue componenti normali k_n e tangenziale k_t . Il fenomeno di rimbalzo del blocco invece è modellato come una caduta libera una volta determinata velocità e angolo di rimbalzo. Con riferimento alla figura.41 abbiamo:

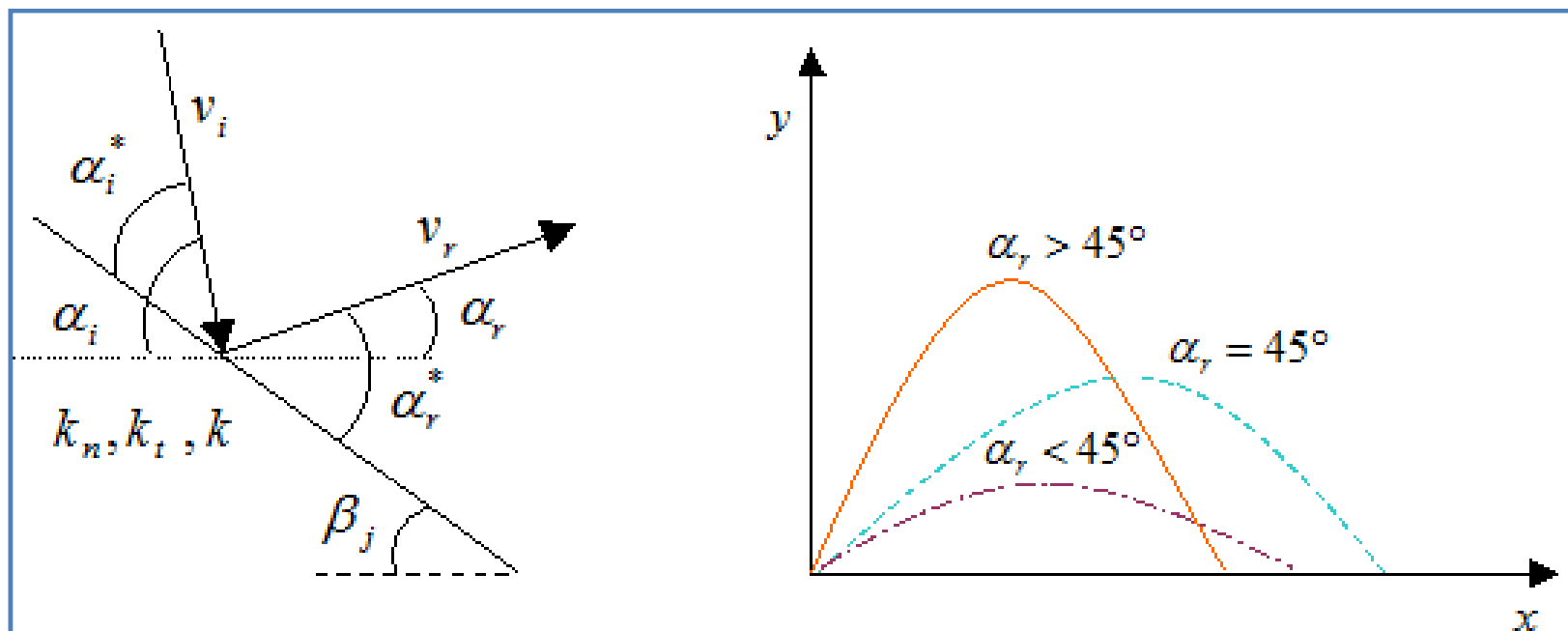


Fig.41: descrizione e grandezze cinematiche del blocco durante la fase d'impatto



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

Utilizzando il coefficiente k si ha:

$$v_r = k \cdot v_i \quad \alpha_r = \alpha_i \quad \text{oppure} \quad \alpha_r = 45^\circ ;$$

Utilizzando i coefficienti k_n e k_t si ha:

$$v_r = \sqrt{v_{nr}^2 + v_{tr}^2} \quad \tan(\alpha_r) = \frac{v_{nr}}{v_{tr}} \quad \alpha_r^* = \alpha_r - \beta_j ;$$

Dove:

$$\begin{cases} v_i = v(x_p) \\ v_{xi} = v_x(x_p) \\ v_{yi} = v_y(x_p) \end{cases} \quad \begin{cases} \alpha_i = a \tan \alpha(x_p) \\ \alpha_i^* = \alpha_i - \beta_j \end{cases} \quad \begin{cases} v_{ni} = -v_i \cdot \sin(\alpha_i^*) \\ v_{ti} = v_i \cdot \cos(\alpha_i^*) \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{nr} = -k_n \cdot v_{ni} \\ v_{tr} = k_t \cdot v_{ti} \end{cases} \quad \begin{cases} v_{yr} = v_r \cdot \sin(\alpha_r^* - \beta_j) \\ v_{xr} = v_r \cdot \cos(\alpha_r^* - \beta_j) \end{cases}$$



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

Utilizzando il coefficiente k si ha: **Condizioni di transizione tra tipi di movimento** : tra le condizioni di transizione tra tipi di movimento possiamo avere:

- *Passaggio tra rotolamento o scivolamento a caduta libera (e viceversa) per brusca variazione della superficie topografica;*
- *Passaggio post-impatto tra moto a rimbalzi a quello di rotolamento o scivolamento;*
- *Arresto del blocco;*

La prima condizione è impostata confrontando l'angolo compreso tra il prolungamento del segmento generico i -esimo ed il suo successivo (variazione di pendenza del profilo topografico) con un valore limite di distacco del blocco dal pendio:

$$\Delta \beta = \beta_j - \beta_{j-1} \leq \alpha_{\text{lim}}$$

Se è verificata la disequazione di cui sopra il **moto è di rotolamento o scivolamento**, altrimenti il moto è **di caduta libera**. Le condizioni iniziali sono quelle **finali del tratto precedente**.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

La seconda condizione è impostata tramite due approcci differenti:

- **Piteau e Clayton (1977)** controllano l'angolo di rimbalzo dopo l'impatto con la seguente condizione:

$$\alpha_r^* \cong 0 \quad e \quad v_r > v_{\lim}$$

Se è verificata la disequazione allora il moto post-impatto è un moto di rotolamento con , $v_0=v_r$, altrimenti il moto è un rimbalzo con $v_0=v_r$ e $\alpha_0=\alpha_r$

- **Hungr ed Evans (1989)** applicano il principio di massima efficienza del moto (il moto post-impatto è il più efficiente, ossia il moto che determina la minore perdita di energia per unità di percorso):

$$\left(\frac{\Delta E}{\Delta l} \right)_{\text{rimbalzo}} = \frac{v_i^2}{2 \cdot g} \cdot \left(\frac{k_t^2 + k_n^2 \cdot \tan^2(\alpha_i)}{1 + \tan^2(\alpha_i)} - 1 \right) < \left(\frac{\Delta E}{\Delta l} \right)_{\text{rotolamento}} = \delta_{\text{rol}}$$

Il primo e secondo termine rappresentano rispettivamente la perdita di energia cinetica specifica nel moto a rimbalzi e nel moto di rotolamento.

Se è verificata la disuguaglianza allora il moto post-impatto è un rimbalzo, altrimenti è un rotolamento.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie.*

La terza condizione può verificarsi in due circostanze diverse:

- arresto nell'impatto: $v_r \leq v_{\lim}$

Se verificata allora **si ha l'arresto nel punto d'impatto.**

- arresto per attrito: $v = 0$

Se verificata allora si ha **l'arresto per attrito lungo il tratto di pendio interessato.** Inoltre possiamo osservare che:

- l'arresto nel punto d'impatto può aversi nel punto d'impatto principale se il **comportamento del materiale è prevalentemente plastico**, oppure in **impatti successivi**;
- l'arresto per attrito può verificarsi in corrispondenza di **una fase di rotolamento o scivolamento**, se il blocco è in una **fase di moto decelerato** ed il **tratto di pendio è abbastanza lungo**;



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.*

Il CRSP è un modello matematico statistico messo a punto da Pfeiffer e Bowen, allo scopo di simulare la caduta di massi aventi forma a sezione circolare nel piano verticale del movimento (sfere, dischi, cilindri). Tale modello aggiunge ulteriori parametri che condizionano il moto dei blocchi rispetto ai Lumped-mass, quali forma e dimensioni del blocco e la rugosità del pendio. Il modello è statistico, la rugosità è variabile aleatoria. Le ipotesi fondamentali sono:

- **Modello ibrido:** *considera il corpo come rigido (a sezione circolare) nelle fasi di caduta libera (rimbalzo) e di roto-scivolamento e come punto materiale nella determinazione del punto d'impatto.*
- **Modello bidimensionale:** *come gli altri modelli anch'esso descrive il moto nel piano ipotizzando le traiettorie più probabili in base alle posizioni dei blocchi e alla topografia e morfologia locale del pendio;*
- **Fase di caduta libera:** *nella fase di caduta libera il blocco è considerato come corpo rigido piano a sezione circolare (disco, cilindro, sfera);*
- **Fase d'impatto:** *nella fase d'impatto il corpo è sempre considerato rigido, però il fenomeno è studiato considerando ulteriori parametri relativi al pendio (la rugosità) e ai blocchi (dimensioni e forma). Il modello assume che l'angolo formato tra la direzione del blocco e il profilo del pendio varia secondo una statistica che deve essere definito per ogni caso analizzato. Il fenomeno d'impatto è studiato utilizzando il principio di conservazione dell'energia totale;*
- **Fase di rotolamento e scivolamento:** *nella fase di rotolamento o scivolamento il corpo è considerato rigido. Tale fase è modellata trattando il rotolamento come una serie di piccoli rimbalzi (per tenere in conto della rugosità del pendio).*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.*

Fase di caduta libera: Con riferimento alla fig.42 vengono applicate le seguenti equazioni:

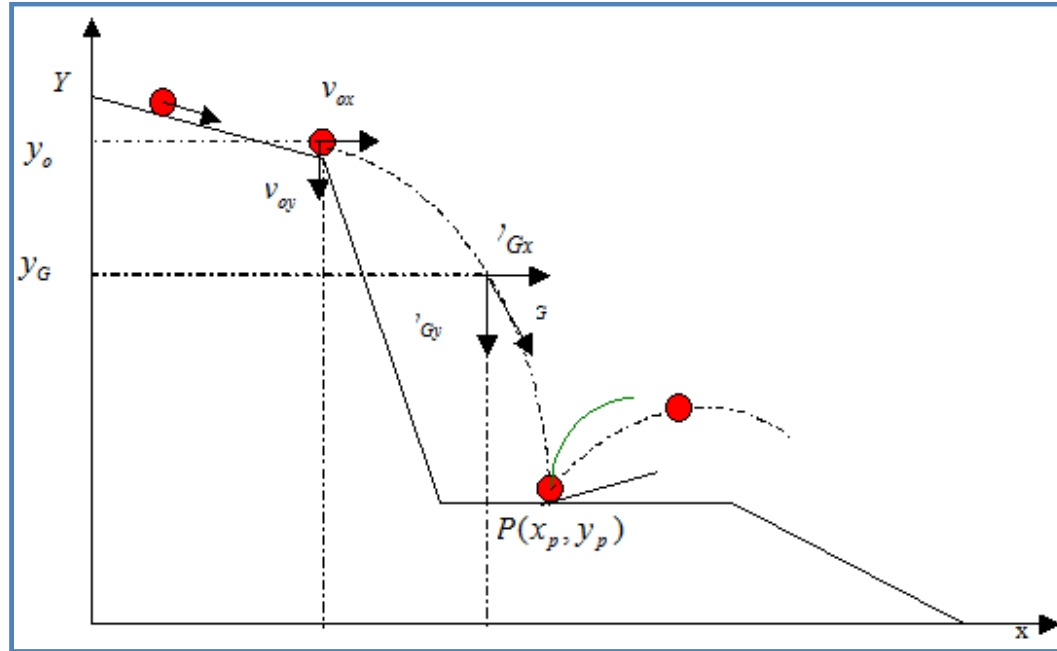


Fig.42: grandezze cinematiche del moto durante la fase di caduta libera (modello CRSP)

Punto d'impatto: per la determinazione del punto d'impatto si applicano le equazioni valide per i lumped mass, da cui si ricavano le coordinate del punto P(X_P,Y_P).

$$\left\{ \begin{array}{l} y_G = y_o + \frac{v_{oy}}{v_{ox}} \cdot (x_G - x_o) - \frac{1}{2} \cdot g \cdot \frac{(x_G - x_o)^2}{v_{ox}^2} \\ \tan \alpha = \frac{v_{Gy}}{v_{Gx}} = \frac{v_{oy}}{v_{ox}} - g \cdot \frac{(x_G - x_o)}{v_{ox}^2} \\ v_{Gx} = v_{ox} \\ v_{Gy} = v_{oy} - \frac{g \cdot (x_G - x_o)}{v_{ox}} \\ v_G = \sqrt{v_{Gx}^2 + v_{Gy}^2} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega(t) = \omega_o = \cos t \\ \theta(t) = \theta_o + \omega_o \cdot t \\ \theta(x_G) = \theta_o + \omega_o \cdot \frac{(x_G - x_o)}{v_{ox}} \end{array} \right.$$



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.*

Fase d'impatto: con riferimento alla fig.43 il fenomeno d'impatto è modellato utilizzando ulteriori parametri oltre i coefficienti di restituzione normale e tangenziale, quali la rugosità del pendio e la dimensione dei blocchi. Il modello CRSP assume che l'angolo formato tra la direzione del blocco ed il profilo locale del pendio varia con una statistica che deve essere definita per ogni caso analizzato.

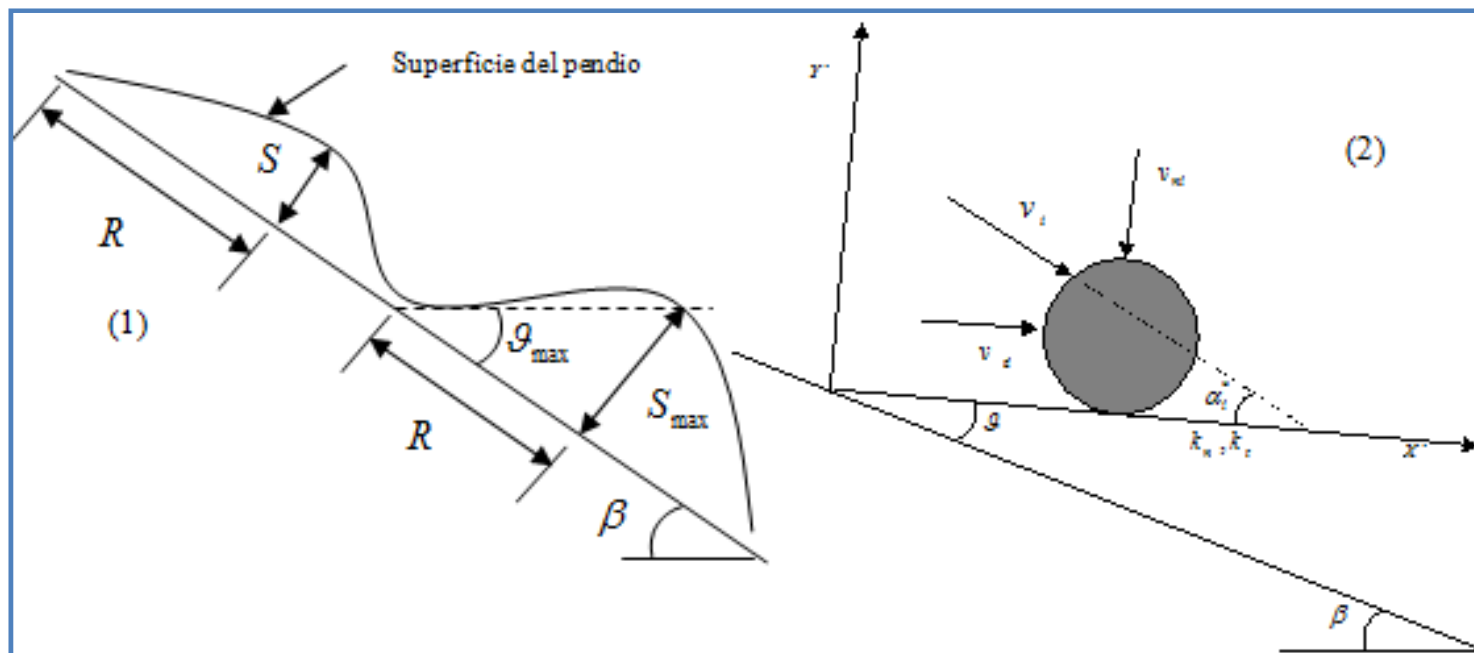


Fig.43: influenza della rugosità del pendio sul percorso del blocco[da Pfeiffer e Bowen,1989].
1)situazione reale; 2)schematizzazione semplificata per il calcolo del moto



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.*

Fase d'impatto: Ad ogni impatto l'inclinazione del profilo del pendio è fatta variare casualmente in un campo di valori compresi tra 0 e θ_{\max} , dove il valore di θ_{\max} dipende dalla rugosità del pendio e dalla dimensione dei blocchi tramite la seguente relazione e deve essere dato per ogni tratto del profilo del pendio :

$$\tan \vartheta_{\max} = \frac{S_{\max}}{R}$$

Con il modello CRSP l'impatto è studiato applicando il principio di conservazione dell'energia totale, tenendo conto tramite espressioni semi-empiriche dell'energia dissipata nell'urto tra blocco e pendio:

$$\left(\frac{1}{2} \cdot I_G \cdot \omega_i^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{ti}^2 \right) \cdot f(F) \cdot SF = \frac{1}{2} \cdot I_G \cdot \omega_r^2 + \frac{1}{2} \cdot m \cdot v_{tr}^2$$

dove:

$$v_{ti} = v_{Gi} \cdot \cos(\alpha_i^* = \alpha_i - \beta + \vartheta) \quad v_{ni} = v_{Gi} \cdot \sin(\alpha_i^* = \alpha_i - \beta + \vartheta)$$

$$f(F) = k_t + \frac{(1 - k_t)}{\left\{ \left[\frac{(v_{ti} - \omega_i \cdot R)}{20} \right]^2 + 1.2 \right\}} \quad SF = \frac{k_t}{\left\{ \left[\frac{v_{ni}}{250 \cdot k_n} \right]^2 + 1 \right\}}$$



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.**

I termini $f(F)$ e SF sono stati ricavati sperimentalmente tramite espressioni empiriche, valutando le perdite d'energia cinetica nell'impatto tra blocco e pendio a causa dell'attrito e dell'urto. L'attrito riguarda principalmente la dissipazione dell'energia cinetica prodotta dalla velocità tangenziale, l'urto quella prodotta dalla velocità normale al pendio. Inoltre per rendere il problema determinato s'ipotizzano le seguenti relazioni :

$$\begin{cases} v_{tr} = \omega_r \cdot R \\ v_{nr} = \frac{v_{ni} \cdot k_n}{1 + \left(\frac{v_{ni}}{9}\right)^2} \end{cases}$$

dove:

- La prima esprime la relazione tra velocità tangenziale e angolare post impatto (assume che i blocchi abbandonano il pendio ruotando indipendentemente dalla velocità angolare pre-impatto);
- Nella seconda la velocità normale post-impatto è messa in relazione con quella pre-impatto tramite un'espressione empirica che tiene conto del fatto verificato sperimentalmente, che il rapporto tra la velocità normale post e pre-impatto diminuisce all'aumentare della velocità normale pre impatto;



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.*

Fase di rimbalzo: Nella fase di rimbalzo vengono applicate le equazioni della caduta libera una volta calcolati i parametri cinematici post- impatto (velocità del centro di massa , angolo di rimbalzo e velocità angolare). Si applicano le equazioni con :

$$\left\{ \begin{array}{l} x_o = x_p \\ y_o = y_p \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{ox} = v_r \cdot \cos \alpha_r \\ v_{oy} = v_r \cdot \sin \alpha_r \\ \omega_o = \omega_r \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \alpha_r = \alpha_r^* + \vartheta - \beta \\ v_r = \sqrt{v_{tr}^2 + v_{nr}^2} \\ \alpha_r^* = a \tan \left(\frac{v_{nr}}{v_{tr}} \right) \end{array} \right.$$

Fase di rotolamento: il rotolamento del masso per tenere conto dell'effetto della rugosità del pendio (il moto di rotolamento reale a causa della rugosità del pendio e dell'irregolarità del blocco risulta un moto rotazioni aeree e brevi collisioni multiple) viene modellato come una serie di piccoli rimbalzi. Facendo in questo modo si tiene conto dell'energia cinetica dissipata nelle collisioni multiple tra blocco e pendio. Per cui si applicano sempre le 3.32 e 3.33 con l'unica variante

$$\alpha_r = \vartheta - \beta$$



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CRSP.*

Condizioni di transizione tra tipi di movimento:

1. Passaggio da moto a rimbalzi a rotoscivolamento:

- *Ad ogni impatto con un processo d'iterazione si calcola il tempo trascorso tra un rimbalzo ed il successivo;*
- *Noto tale tempo si può determinare la posizione relativa alla nuova posizione d'impatto e quindi la distanza orizzontale tra due impatti;*
- *Se la distanza tra due rimbalzi è inferiore al raggio del blocco considerato il moto post-impatto è di rotolamento o di scivolamento , altrimenti è un rimbalzo ;*

2. Arresto del blocco;

- *Se $v_r < v_{lim}$ allora si ha l'arresto nel punto d'impatto. Tale condizione per le ipotesi fatte si utilizza anche nella fase di rotolamento;*

Osservazioni sul CRSP: il modello CRSP fa un passo in avanti nella modellazione matematica del problema di caduta massi, in quanto permette di portare in conto due parametri che influenzano il moto dei blocchi, quali la rugosità del pendio e la dimensione e forma dei blocchi, l'effetto che provocano ad ogni impatto sul moto, ed inoltre permettono di simulare più realisticamente il fenomeno del rotolamento.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

CADMA è un modello matematico di simulazione di caduta massi messo a punto da alcuni ricercatori dell'ISMES (Azzoni & La Barbera, 1995) di Bergamo in collaborazione con ricercatori dell'ENEL CRIS di Milano intorno agli anni 90. Con tale modello si fa un passo in avanti nella modellazione, in quanto si riesce a tenere in conto in qualche modo dell'influenza della forma e dimensioni dei blocchi sul percorso dei blocchi e sulle grandezze cinematiche (velocità, energia,).

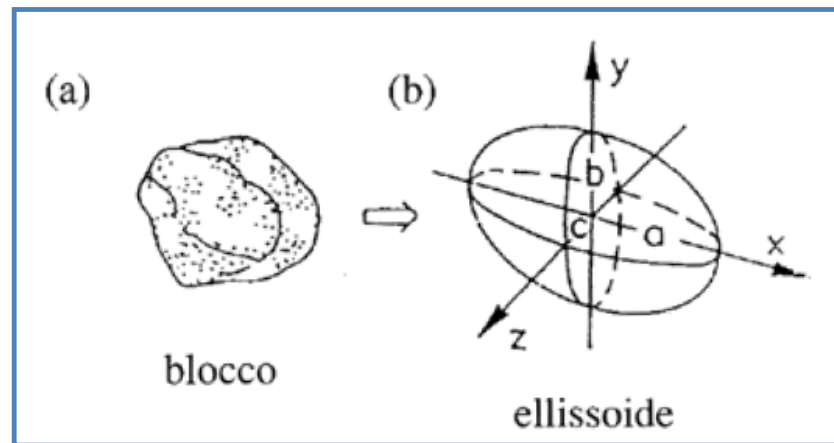


Fig.44: a) Blocco reale b) blocco idealizzato [da Bozzolo et.al1988].

Le ipotesi fondamentali del metodo sono:

- **Modello ibrido:** il moto del corpo è assunto come corpo rigido in alcune fasi del moto e come punto materiale in altre;
- **Modello bidimensionale:** i percorsi dei blocchi sono stabiliti a priori sulla planimetria (tenendo conto delle zone di distacco della topografia e della morfologia del pendio);



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

- **Impatto:** i blocchi all'impatto sono considerati come corpi rigidi di forma ellissoidica (la sezione del blocco è un'ellisse di semiassi a e b), inoltre il blocco mantiene inalterato il volume dopo l'urto, escludendo fenomeni di rottura. Inoltre s'ipotizza che la zona di contatto blocco pendio è considerata puntiforme e che tale punto diventa centro d'istantanea rotazione;
- **Fase di caduta libera:** in tale fase il blocco è considerato come corpo rigido di forma ellissoidica o sferica, mentre nella determinazione del punto d'impatto è schematizzato come punto materiale;
- **Fase di rotolamento e scivolamento:** nella fase di rotolamento o scivolamento il blocco è schematizzato come corpo rigido a sezione circolare (sfera, cilindro, disco) che ruota in presenza di attrito al rotolamento o allo scivolamento;

Analisi statistica : siccome tutte le grandezze utilizzate dal modello hanno variabilità infinita e casuale, viene affiancato al metodo Monte Carlo considerando aleatorie le seguenti variabili :

- *Forma e dimensioni del masso;*
- *Inclinazione locale del pendio all'impatto (effetto della rugosità sul moto post-impatto) ;*
- *Punto di distacco e angolo di lancio.*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

Fase di caduta libera : con riferimento alla fig.45 viene trattata la fase :

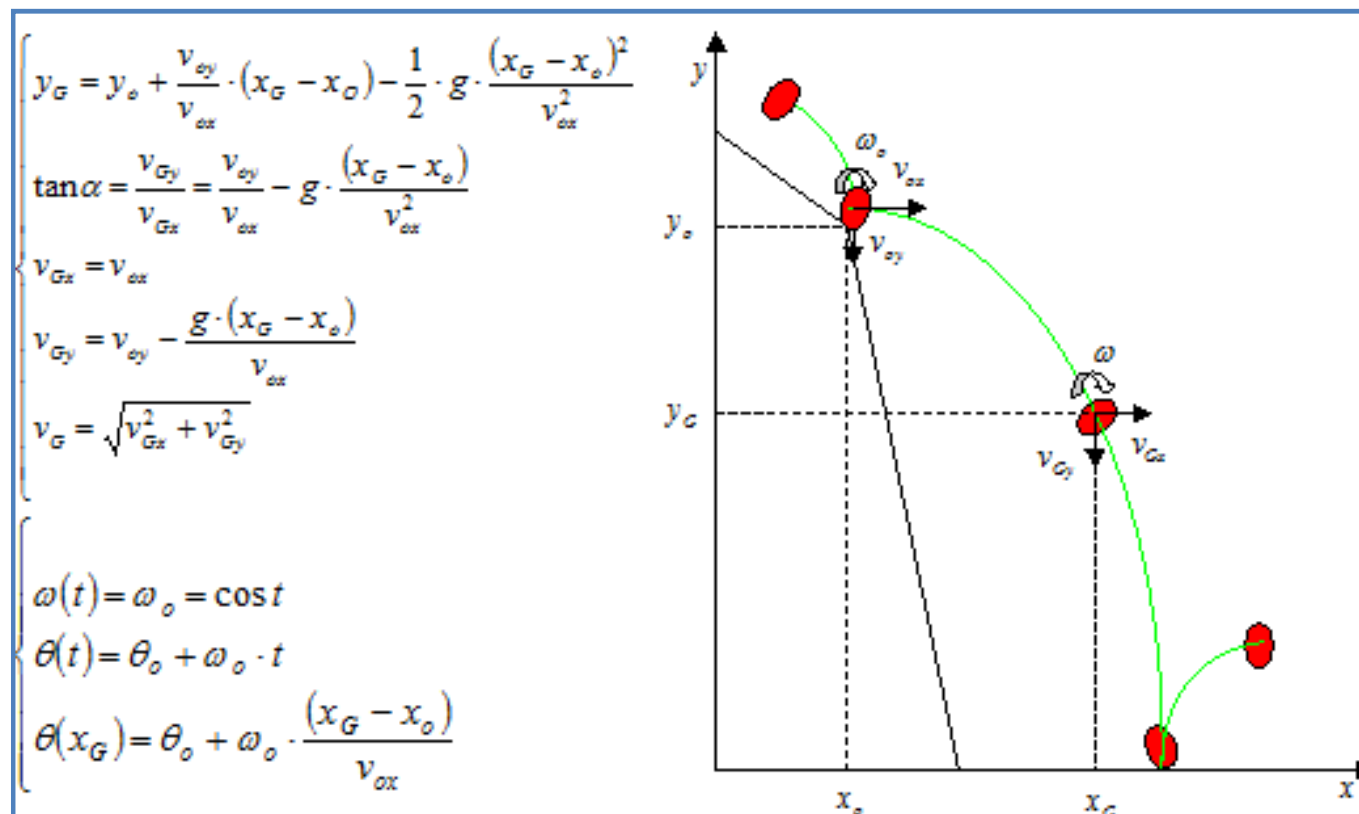


Fig.45: grandezze cinematiche del moto durante la fase di caduta libera caduta libera (metodo CADMA)

Punto d'impatto: per la determinazione del punto d'impatto si applicano le equazioni valide per i lumped mass, da cui si ricavano le coordinate del punto P(X_P,Y_P).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

Fase d'impatto: con riferimento alle ipotesi fatte e ricordando che in fenomeno d'urto le forze interne sono preponderanti rispetto a quelle esterne (gravità, attrito) e siccome le prime si esplicano nella zona di contatto (considerata puntiforme), allora il fenomeno d'impatto può essere studiato applicando il principio di conservazione del momento angolare. Con riferimento alla fig.46 abbiamo:

$$I \cdot \omega_i + v_{x_i} \cdot dy - v_{y_i} \cdot dx = I \cdot \omega_r + v_{x_r} \cdot dy - v_{y_r} \cdot dx$$

$$\begin{cases} v_{x_r} = \omega_r \cdot dy \\ v_{y_r} = -\omega_r \cdot dx \end{cases}$$

$$\omega_r = \frac{I \cdot \omega_i + v_{x_i} \cdot dy - v_{y_i} \cdot dx}{I + dx^2 + dy^2}$$

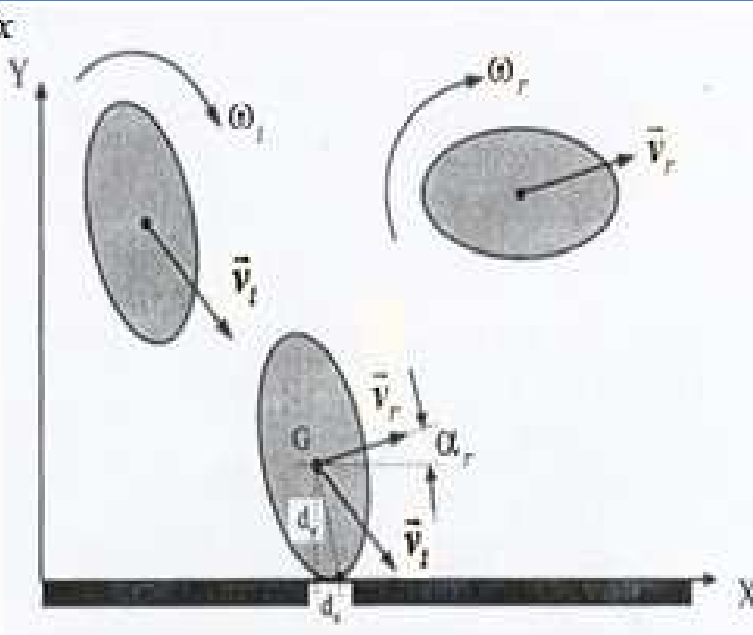
$$\varepsilon^* = \frac{K_r}{K_i} = \frac{Q_i^2}{2 \cdot K_i \cdot (I + r^2)}$$


Fig.46: schematizzazione del blocco all'impatto [da Azzoni ed altri, 1996]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA**

dove:

$$K_r = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot \omega_r^2 + v_{x'r}^2 + v_{y'r}^2) \quad K_i = \frac{1}{2} \cdot (I \cdot \omega_i^2 + v_{x'i}^2 + v_{y'i}^2) \quad Q_i = I \cdot \omega_i + v_{x'i} \cdot dy - v_{y'i} \cdot dx$$

$$dx = x_G - x_P \quad dy = y_G - y_P \quad r = \sqrt{dx^2 + dy^2}$$

Potrebbe però essere che i valori di ϵ^* così calcolati, possono essere elevati rispetto alle evidenze sperimentale (non validità del principio di conservazione del momento angolare). In questo caso si assegna ad ogni tratto di pendio un limite superiore del coefficiente di restituzione dell'energia ϵ^*_{\max} da determinare sperimentalmente. Per cui abbiamo:

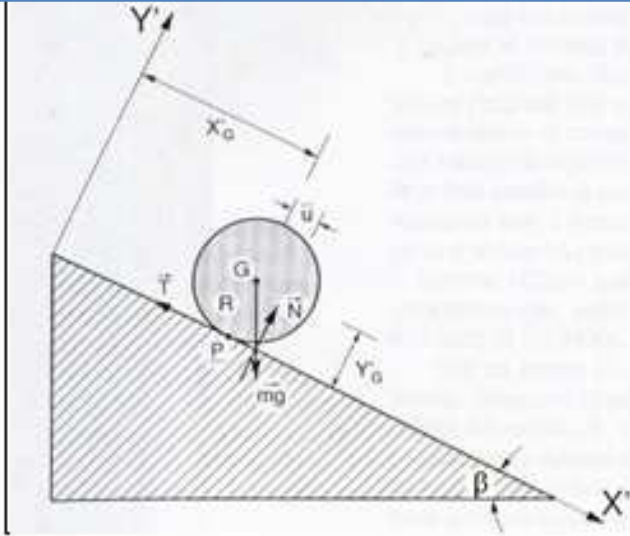
- Se $\epsilon^* < \epsilon^*_{\max}$ si conserva il momento angolare, per cui si applicano per calcolare le grandezze cinematiche post-impatto (velocità di traslazione, di rotazione e l'energia cinetica etc.) le equazioni precedenti;
- Se $\epsilon^* \geq \epsilon^*_{\max}$ il momento angolare non è conservato, per cui si assume $\epsilon^* = \epsilon^*_{\max}$ come limite superiore, ma mantenendo ancora come ipotesi che il punto d'impatto rimane centro d'istantanea rotazione abbiamo:

$$K_r = \epsilon^*_{\max} \cdot K_i \quad \omega_r = \sqrt{\frac{2 \cdot \epsilon^*_{\max} \cdot K_i}{I + r^2}}$$
- per calcolare la velocità del centro di massa si applicano le stesse equazioni in virtù dell'ipotesi mantenuta precedentemente.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

Fase di rotolamento e scivolamento: Con riferimento alla fig.47 e alle ipotesi fatte abbiamo :



$$\begin{cases} N - m \cdot g \cdot \cos(\beta) = 0 \\ m \cdot g \cdot \sin(\beta) - T = m \cdot \ddot{x}_G \\ T \cdot R - N \cdot \bar{u} = I_G \cdot \ddot{\theta} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T = \frac{I_G}{R^2} \cdot \ddot{x}_G + N \cdot \frac{\bar{u}}{R} \\ N = m \cdot g \cdot \cos(\beta) \\ \ddot{\theta} = \frac{\ddot{x}_G}{R} \end{cases}$$

$$\ddot{x}_G = a_G = A \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{rol})$$

$$\begin{cases} A = \frac{m}{m + \frac{I_G}{R^2}} \\ \delta_{rol} = \frac{\bar{u}}{R} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{x}_G = v_G = A \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{rol}) \cdot t + \dot{x}_{G0} \\ x_G = \frac{1}{2} \cdot A \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{rol}) \cdot t^2 + \dot{x}_{G0} \cdot t + x_{G0} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} t = \frac{\dot{x}_G - \dot{x}_{G0}}{A \cdot g \cdot \cos(\beta) \cdot (\tan \beta - \tan \delta_{rol})} \\ x_G = \sqrt{\dot{x}_{G0}^2 + 2 \cdot g \cdot A \cos(\beta) (\tan \beta - \tan \delta_{rol}) \cdot (x_G - x_{G0})} \\ \tan \delta_{rol} = \tan \beta - \frac{\dot{x}_G^2 - \dot{x}_{G0}^2}{2 \cdot g \cdot A \cdot (x_G - x_{G0})} \end{cases}$$

$$\begin{cases} v_{ox} = v_{x'} \\ v_{oy} = v_{y'} \\ \omega_o = \omega_r \end{cases}$$

$$K = \frac{1}{2} \cdot m \cdot \dot{x}_G^2 + \frac{1}{2} \cdot I_G \cdot \dot{\theta}^2$$

Fig.47: schematizzazione del blocco nella fase di rotolamento e grandezze cinematiche [da Azzoni, 1995]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

Fase di rotolamento e scivolamento: Osserviamo come dalle 47 la velocità del blocco (traslazione e di rotazione) dipende oltre che dalla geometria e dai parametri fisici del pendio, anche dalla forma del corpo tramite il fattore .Possiamo ricavare dalle 47 la formula del coefficiente d'attrito al rotolamento, utile da sfruttare per l'interpretazione dei risultati ottenuti da prove in sito.

Fase di rimbalzo: nella fase di rimbalzo vengono applicate le equazioni della caduta libera una volta calcolati i parametri cinematici post-impatto. Si applicano le stesse equazioni.

$$\begin{cases} x_o = x_p \\ y_o = y_p \end{cases} \quad \begin{cases} v_{ox} = v_{xr} \\ v_{oy} = v_{yr} \\ \omega_o = \omega_r \end{cases}$$



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie CADMA*

Condizioni di transizione tra tipi di movimenti:

- a) $dx' > 0$, $v_{y,r} < 0$ e $\varepsilon^* > 0$ il blocco rotola;
- b) $dx' = 0$, $v_{y,r} = 0$ e $\varepsilon^* > 0$ il blocco rotola;
- c) $dx' < 0$, $v_{y,r} > v_y^*$ e $\varepsilon^* > 0$ il blocco rimbalza, altrimenti rotola;
- arresto del blocco*
- ◆ $\varepsilon^* \cong 0$ il blocco si arresta nel punto d'impatto;
 - ◆ $v_G = 0$ in un tratto di rotolamento, allora si arresto per attrito;
- cambio topografia del pendio*
- ◆ $v_{G\text{finale}}^n < v_y^*$ il blocco continua a rotolare, altrimenti caduta libera;

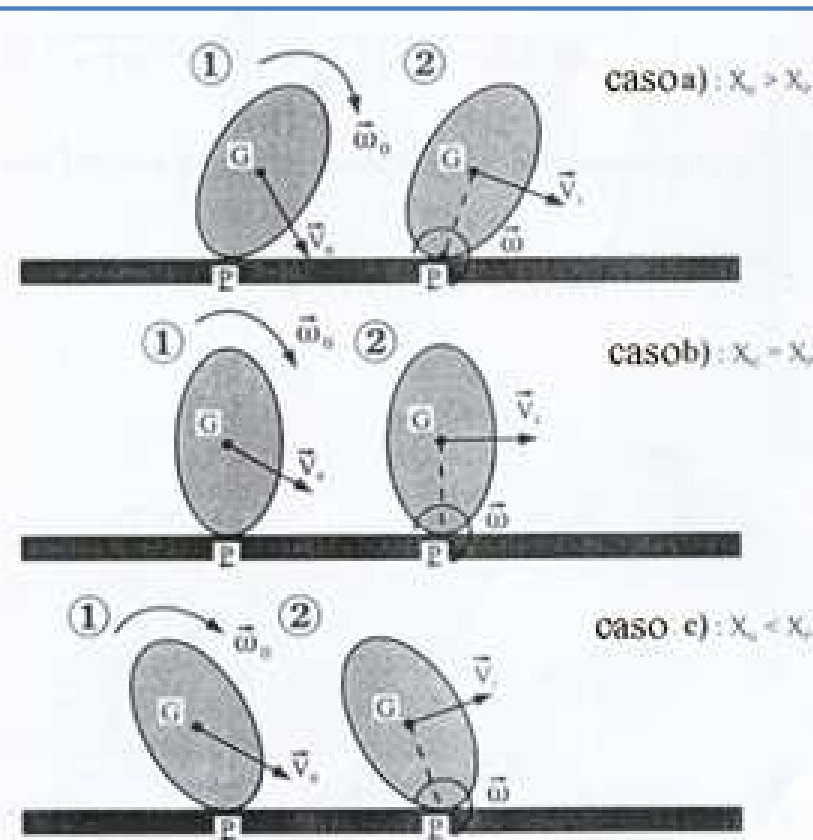


Fig.48: Condizioni di transizione tra tipi di movimenti e differenti tipologie di moto post-impatto[da Azzoni ed altri,1995]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

L'utilizzo di una modellazione basata sul punto materiale o di blocchi di forma assegnata (sfera, cilindro, ellissoide, forme non reali del masso) non permette di considerare l'influenza che ha la forma e le dimensioni reali dei blocchi sui percorsi di caduta e sulle grandezze cinematiche del moto (velocità, altezze di rimbalzo, punti d'arresto etc.).

Il modello **BRGM** è stato messo a punto da alcuni ricercatori Francesi (Falcetta et al., 1984). Il calcolo delle traiettorie è basato sull'algoritmo di Cundall (DEM) in una forma semplificata. Rispetto agli altri modelli precedenti, analizza il fenomeno d'impatto in maniera più rigorosa utilizzando un legame tensioni deformazioni per il pendio secondo il tipo di materiale (roccia, detrito etc.) e del comportamento meccanico (elastico, elastoplastico, plastico). I vantaggi ottenuti con questo modello sono:

- *Il blocco è considerato nella sua forma reale avente la propria inerzia;*
- *È possibile calcolare forze di contatto impulsive e le deformazioni nella zona d'impatto;*
- *Lo schema di calcolo è unico e i tipi di movimento possono essere qualsiasi (scivolamento, scivolamento e ribaltamento, rotolamento con collisioni multiple, etc.).*



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. **Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM***

Le ipotesi fondamentali del modello sono:

- *Il blocco è considerato come un poligono definito dai suoi vertici, omogeneo e indeformabile (rigido);*
- *Il profilo del pendio è rappresentato da una successione di segmenti rettilinei;*
- *Il modello è bidimensionale;*
- *Il fenomeno d'impatto è studiato ipotizzando un legame forza-spostamento assegnato, dipendente dal comportamento del materiale del pendio (elastico, elastoplastico, plastico) e dal tipo d'impatto blocco-pendio (spigolo, faccia);*
- *Nella fase di caduta libera la resistenza all'aria è trascurata.*

Il movimento del blocco è descritto dalle equazioni della meccanica del corpo rigido in moto piano. L'integrazione delle equazioni del moto è fatta passo, passo scegliendo intervalli di tempo piccoli (per avere una soluzione stabile) una volta note le forze applicate sul blocco. Il modello considera sia gli aspetti cinematici (legge del movimento) sia dinamici (legge forza-spostamento).



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

Con tale approccio, il fenomeno d'impatto è studiato tramite due funzioni di contatto (forze d'urto) F_N , F_T responsabili degli spostamenti normali e tangenziali (deformazioni) del pendio nella zona d'impatto. *Le funzioni di contatto hanno leggi costitutive diverse a secondo del tipo d'impatto (contatto spigolo versante o faccia versante) (vedi fig.49) e del tipo di comportamento meccanico del materiale (elastico, elastoplastico, plastico) costituente il pendio.*

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n Fx_i = m \cdot \ddot{x}_G \\ \sum_{i=1}^n Fy_i = m \cdot \ddot{y}_G \\ \sum_{i=1}^n M_{Gi} = I_G \cdot \ddot{\theta} \end{cases}$$

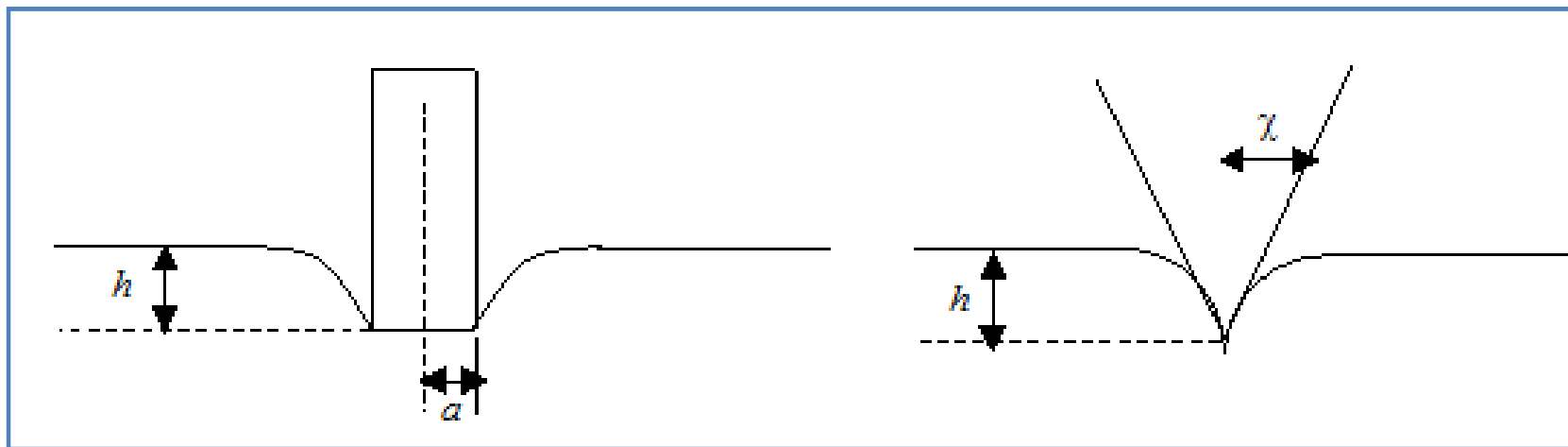


Fig.49 : condizioni limiti di contatto blocco versante: faccia versante e spigolo versante [da Falcetta,1985]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

Funzione di contatto normale :

FUNZIONE DI CONTATTO NORMALE F_N			
Tipo di contatto	Comportamento meccanico del materiale		
	Elastico [es roccia]	Elastoplastico [es detrito] [impatti di blocchi di forma sferica]	Plastico [es terreno]
Spigolo versante	$F_N = K_1 \tan(\chi) \cdot h^2$	$F_N = K_4 \cdot h^{\frac{3}{2}}$	$F_N = K_3 \cdot \tan^2 \chi \cdot h^2$
Faccia versante	$F_N = K_1 \cdot a \cdot h$		$F_N = K_2$
Impatti con blocchi a forma di cuneo	$F_N = K_5 \cdot h$	//	//

Tabella.1: funzioni di contatto normali F_N determinate sperimentalmente da prove di laboratorio, per blocchi di forma diversa e diversa tipologia del materiale [da SNEDDON, 1965; JOHNSON, 1970; SAMAMA, 1982]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

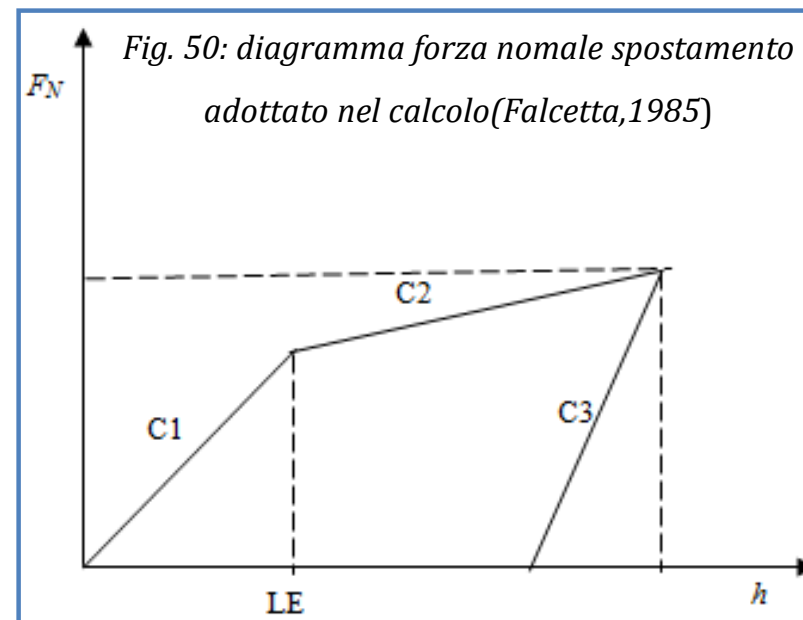
Funzione di contatto normale : Per semplificare ulteriormente l'analisi si fa riferimento al legame forza normale-spostamento riportato nella figura 50.

dove:

- h : spostamento normale del punto di contatto;
- $C1$ e $C2$ parametri caratteristici del fenomeno di penetrazione;
- $C3$ parametro caratteristico della fase elastica di restituzione;
- LE limite del dominio tra $C1$ e $C2$;
- MU coefficiente di attrito al contatto;

Inoltre:

- $C1, C2, C3, MU, LE$ dipendono dalla geometria del contatto e dal comportamento del materiale;
- Se $C1 < C3$ e $C2 < C3$ allora $C3$ rappresenta il comportamento elastico del materiale, mentre $C1$ e $C2$ rappresentano il comportamento elastoplastico;
- L'area racchiusa dal diagramma forza-spostamento rappresenta l'energia dissipata;
- $C1 < C2$ in un contatto faccia versante mentre in un contatto spigolo versante si ha $C1 > C2$;



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

Funzione di contatto tangenziale FT : Durante l'impatto del blocco con il pendio gli spostamenti tangenziali al pendio fanno nascere una componente tangenziale delle forze d'impatto. Nel metodo questa componente tangenziale della forza è posta proporzionale a h tramite la seguente relazione:

dove $C4$ è funzione di $C1, C2$ e MU

Procedimento di calcolo:
$$F_T = C4 \cdot h$$

Il calcolo avviene per integrazione numerica fatta per piccoli passi temporali delle tre equazioni differenziali del moto riferite al baricentro del blocco.

- *Ad ogni impatto sono associate alle equazioni del moto, le forze di contatto normali e tangenziali. A questo punto s'innesca un processo di calcolo che porta al calcolo delle forze impulsive FN e FT e delle deformazioni del pendio (h).*
- *Il valore massimo di h si ricava dal sistema di equazioni quando la velocità del blocco soggetto al sistema **di forze si annulla (massima deformazione)**.*
- *Il distacco del blocco dal pendio si ha quando le **forze di contatto si annullano (fine restituzione)**.*

In questo modo si possono determinare tutte le grandezze cinematiche (velocità, energia dissipata, deformazioni del pendio), e dinamiche (forze d'impatto) nel tempo e quindi individuare i valori massimi e minimi.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

Nella fig.51 è riportata una simulazione effettuata con questo modello.

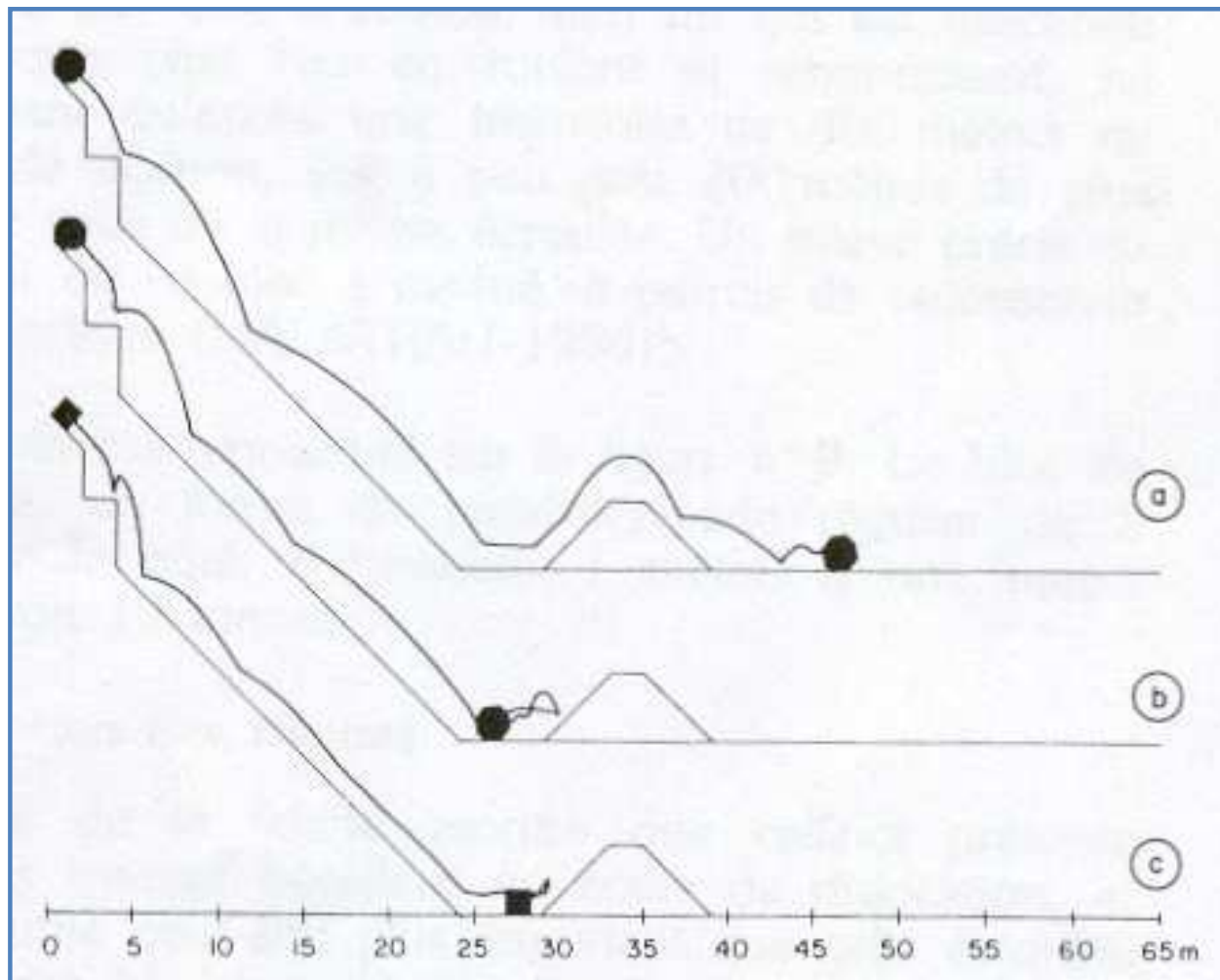


Fig. 51: Influenza della forma e della velocità iniziale sulla traiettoria del blocco:

Caso (a) $v_0=2.8\text{m/s}$ poligono regolare;

Caso (b) $v_0=1.4\text{m/s}$. poligono regolare;

Caso (c) $v_0=2.8\text{m/s}$ forma di parallelepipedo

[da Falcetta, 1985]



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie BRGM-RBIM*

Il metodo del RIGID BODY IMPACT (Rockfall 5.0, Rocscience Toronto) è molto simile al metodo BRGM, versione semplificata del metodo DEM, la differenza sta nella simulazione dell'impatto dove l'interazione con il pendio nelle due direzioni normali e tangenziali si utilizza il modello elasto viscoso equivalente alla Kelvin Voigt con elementi no tension e ad attrito in serie (vedi fig.52-53).

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0$$

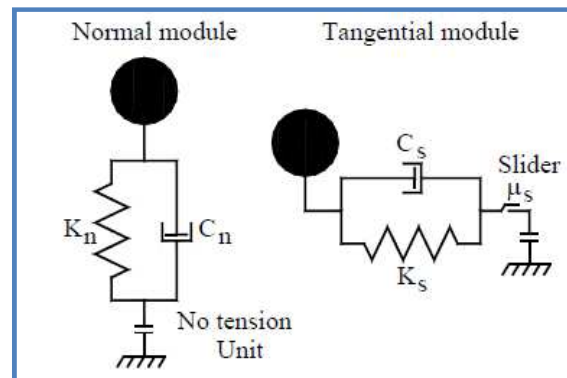


Fig. 52: Kelvin-Voigt system of spring and dashpots in normal and tangential directions with a no-tension unit in normal direction and a slider in tangential direction.

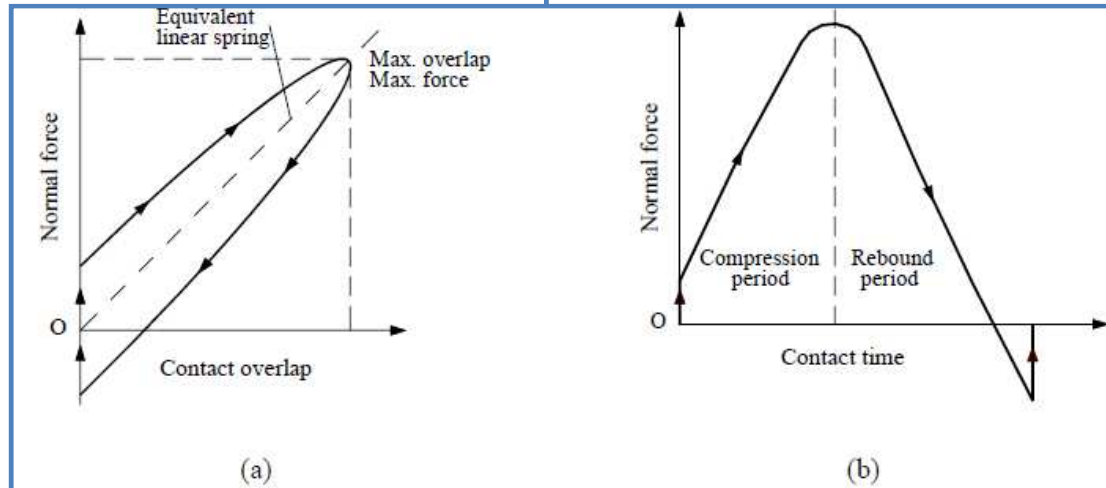


Fig.53: Variation of the contact's normal force in the linear viscoelastic system defined by Equation motion: (a) versus overlap, and (b) versus time.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie – Analisi statistica con Metodo di Montecarlo*

Il problema della simulazione di caduta massi è fortemente aleatorio, basti pensare all'incertezza dei parametri da introdurre nella simulazione, in particolare **KN**, **KT** (*coefficienti di restituzione dell'energia*), **δ_{roll}** (*angolo d'attrito masso versante al rotoscivolamento*), **V** (*volume del masso in caduta*) e le condizioni iniziali di distacco e del moto iniziale (**x_0, y_0, v_0, α_0**) fanno sì che la risposta del sistema non è deterministica ossia a piccole variazioni dei parametri di input corrisponde forte variazioni dei parametri di output con carattere stocastico. Quindi al fine di poter ottenere risultati affidabili è necessario effettuare numerose simulazioni in modo da avere un campione statisticamente affidabile.

Il metodo probabilistico più utilizzato è quello **di MONTECARLO**, che si basa sulla generazione di numeri casuali, scelti in determinati intervalli (0-1), 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.



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie – Analisi statistica con Metodo di Montecarlo*

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 (coefficiente di restituzione), δ_{roll} 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 , δ_{roll} 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**, **δ_{roll}** e **V** e si effettuano le simulazioni numeriche, ripetendo n volte ($500 < n < 1000$) si ottiene una distribuzione statistica stabile dei parametri di output in termini di frequenza o probabilità, quali i punti di arresto dei massi, le energie cinetiche, velocità, altezze di rimbalzo etc.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Metodi di analisi e di simulazione delle traiettorie - Analisi statistica con Metodo di Montecarlo*

Un applicazione di questo metodo (fig.54) è stata effettuata Barla e Scavia, con il modello di Piteau . Le variabili aleatorie scelte con distribuzione di frequenza cumulata assegnata sono:

- le componenti della velocità iniziale (V_{OX} , V_{OY}) per tenere conto delle incertezze relative al punto di distacco;
- l'angolo d'inclinazione (β) del pendio nella zona d'impatto , per tenere conto delle irregolarità su piccola scala del pendio , suddiviso in segmenti a pendenza costante;
- i coefficienti di restituzione (KN , KT) e l'angolo d'attrito al rotolamento (δ_{rol}).

Così operando si ottengono numerose informazioni quali distribuzione dei punti di arresto e relative traiettorie, dell'energia cinetica, altezze di rimbalzo etc.)

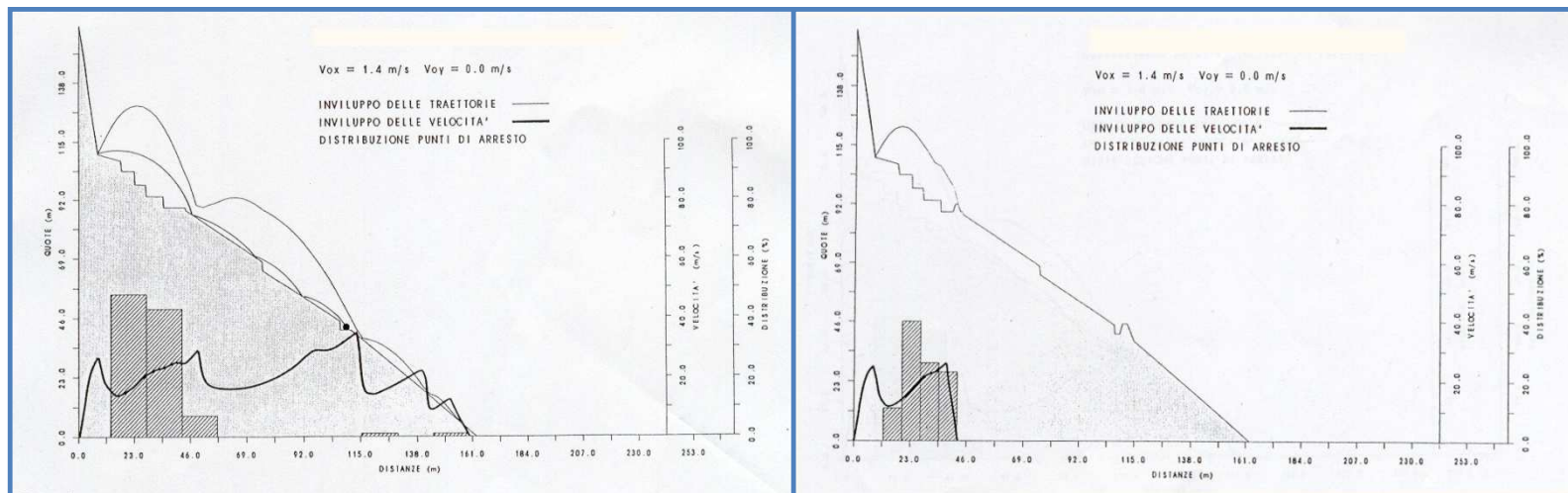


Fig.54: analisi probabilistica di caduta di massi in assenza e presenza di interventi da [Scavia e Barla,1988]



4. **PENDII IN ROCCIA** : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ*

CARATTERISTICHE DEL SITO

- Il versante in località Acquafredda immerge mediamente a sud ed a un'inclinazione variabile da 85 - 90° nell'ammasso roccioso a monte ai 40 - 50 ° del pendio.
- La zona di possibile distacco è rappresentata dall'ammasso roccioso molto ripido, costituito da calcari estremamente alterati (scoloriti) e fratturati.
- I due sistemi di discontinuità principali isolano blocchi di forma parallelepipedo allungata e tabulari che possono ribaltare da altezze comprese tra i 100-150 m di dislivello dal piano stradale e di circa 350-400 dal livello del mare.
- Il substrato è praticamente roccioso nell'intera zona di distacco, mentre al piede è ricoperto da un modesto spessore di detrito (piccoli blocchi) e terreno. la vegetazione è rada.
- Sono presenti lungo il pendio degli impluvi naturali che sono in parte riempiti di blocchi crollati in passato.
- Sono presenti sul pendio barriere paramassi con classe energetica V5 (2000 KJ) posizionate su tre- quattro livelli al piede della SS n° 18, oltre a barriere di tipo rigido e semirigido con classe energetica non superiore ai 100-150 KJ.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

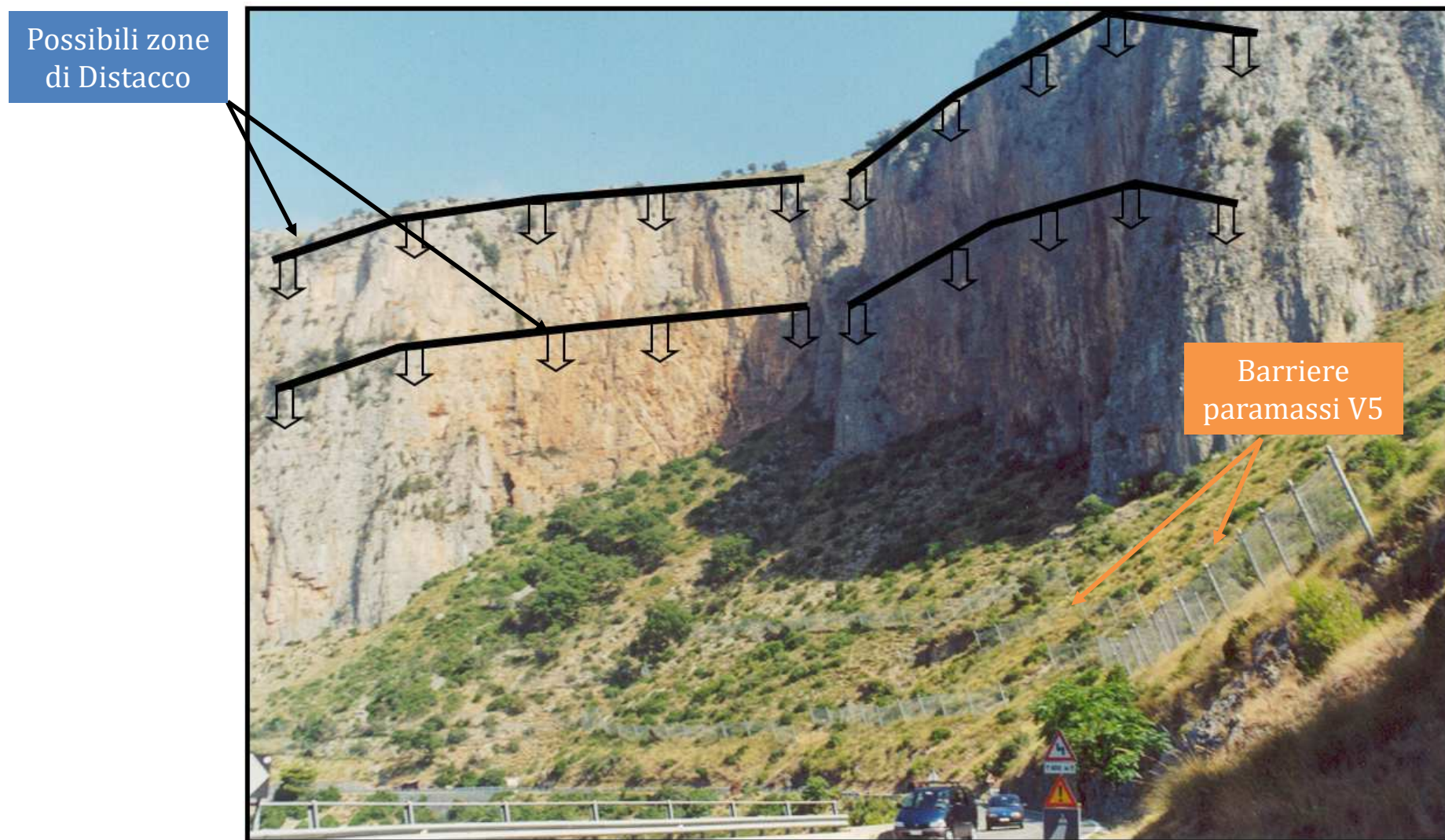


Fig.55: Ammasso roccioso in località Acquafredda di Maratea lungo la SS-18



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

Possibile caduta libera con impatti su roccia sottostante. Cause: azioni idrauliche termiche o sismiche



Possibile caduta libera pre-ribaltamento con impatti multipli su roccia sottostante , possibile frammentazione del blocco



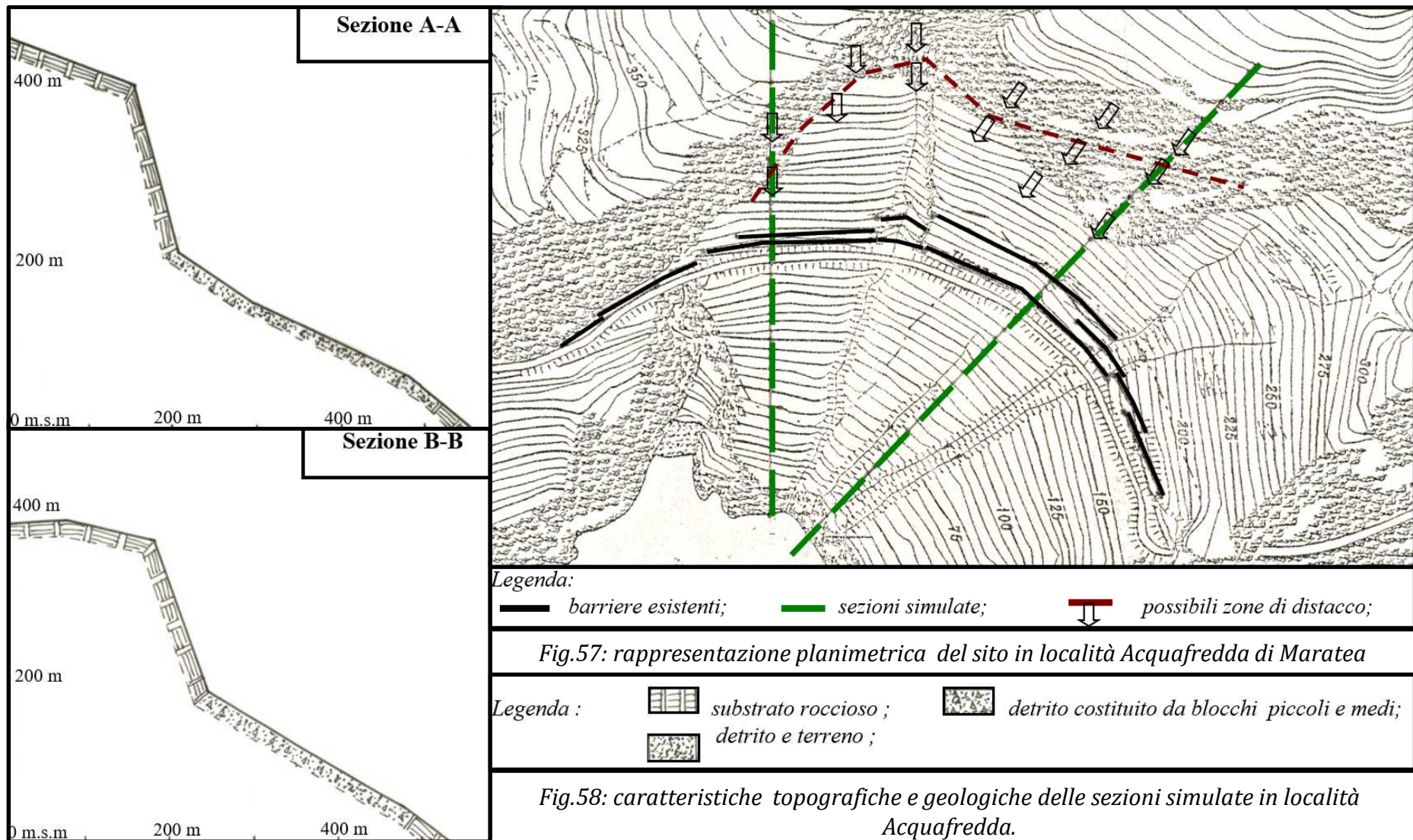
Possibile rimobilizzazione di blocchi già crollati e arrestati sul pendio. Scorrimento/rotolamento per azioni idrauliche sismiche o impatto di blocchi da monte



*Fig.56: Blocchi in incipiente collasso
Condizioni iniziali del moto*



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ*

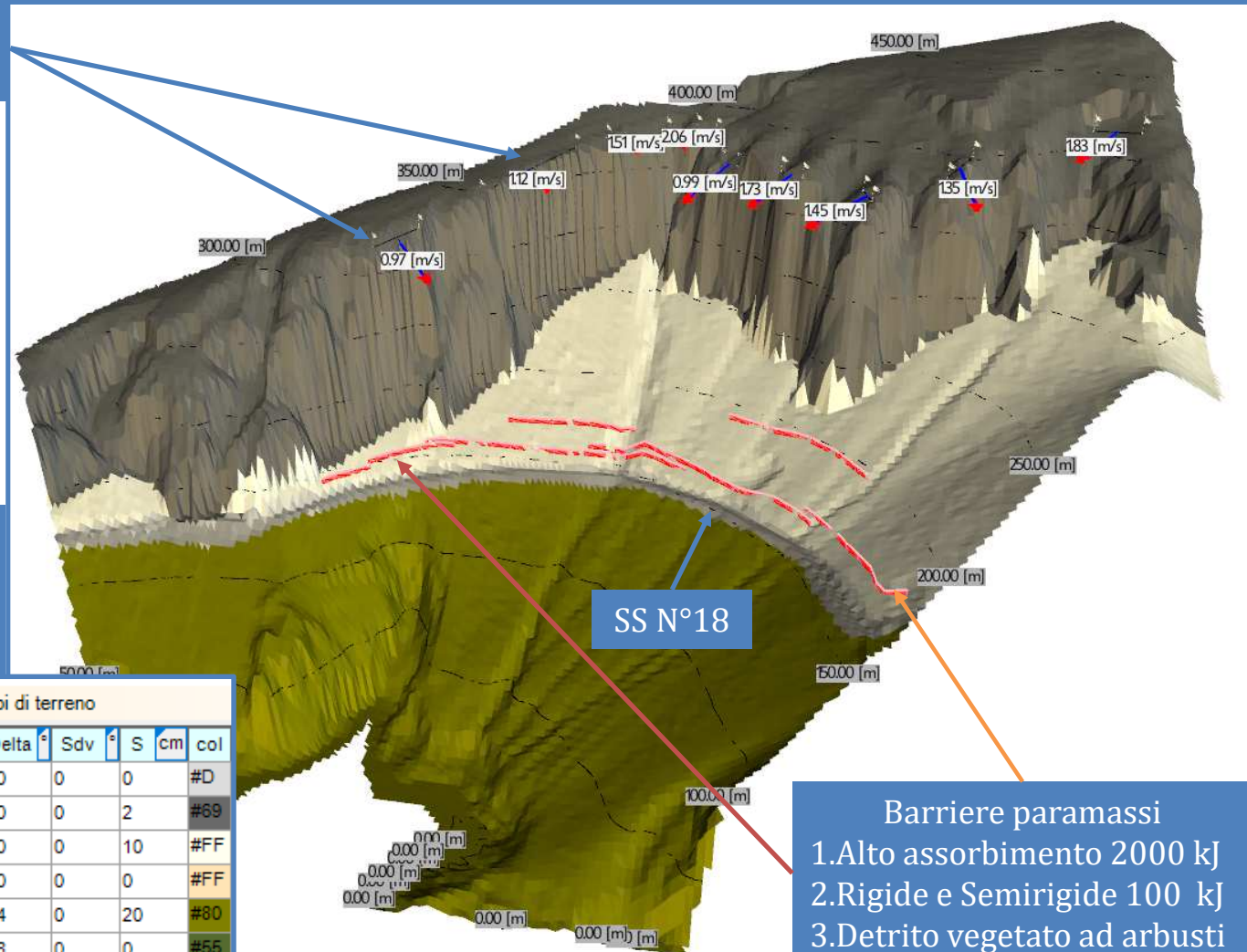


4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

Zone di distacco con
velocità iniziale

Materiali Substrato :
1.Affioramento roccioso
2.Detrito grossolano
3.Detrito vegetato ad arbusti

Tipi di terreno										
descrizione	Rn	Sdv	Rt	Sdv	Delta °	Sdv °	S	cm	col	
roccia in posto	0.4	0	0.87	0	20	0	0		#D	
Affioramenti di rocce...	0.38	0	0.85	0	20	0	2		#69	
Detrito grossolano n...	0.35	0	0.85	0	30	0	10		#FF	
Detrito medio fine no...	0.31	0	0.83	0	30	0	0		#FF	
Detrito vegetato ad a...	0.3	0	0.7	0	34	0	20		#80	
Detrito vegetato a bo...	0.28	0	0.6	0	38	0	0		#55	



Barriere paramassi
1.Alto assorbimento 2000 kJ
2.Rigide e Semirigide 100 kJ
3.Detrito vegetato ad arbusti

Fig.59: Modello DTM costone roccioso in località Acquafredda.



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

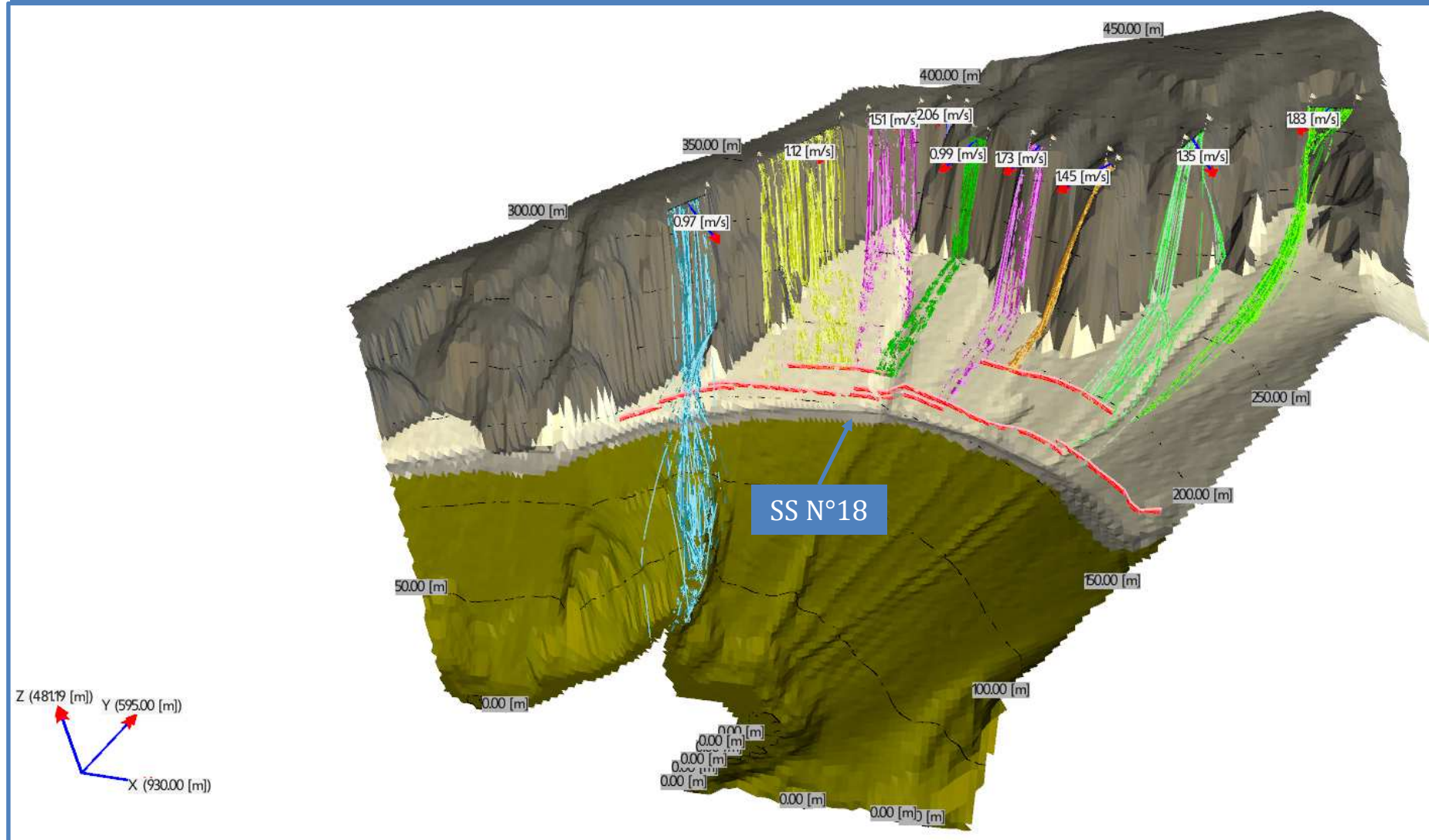


Fig.60: Modello DTM – Traiettorie 3D per zone di distacco



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

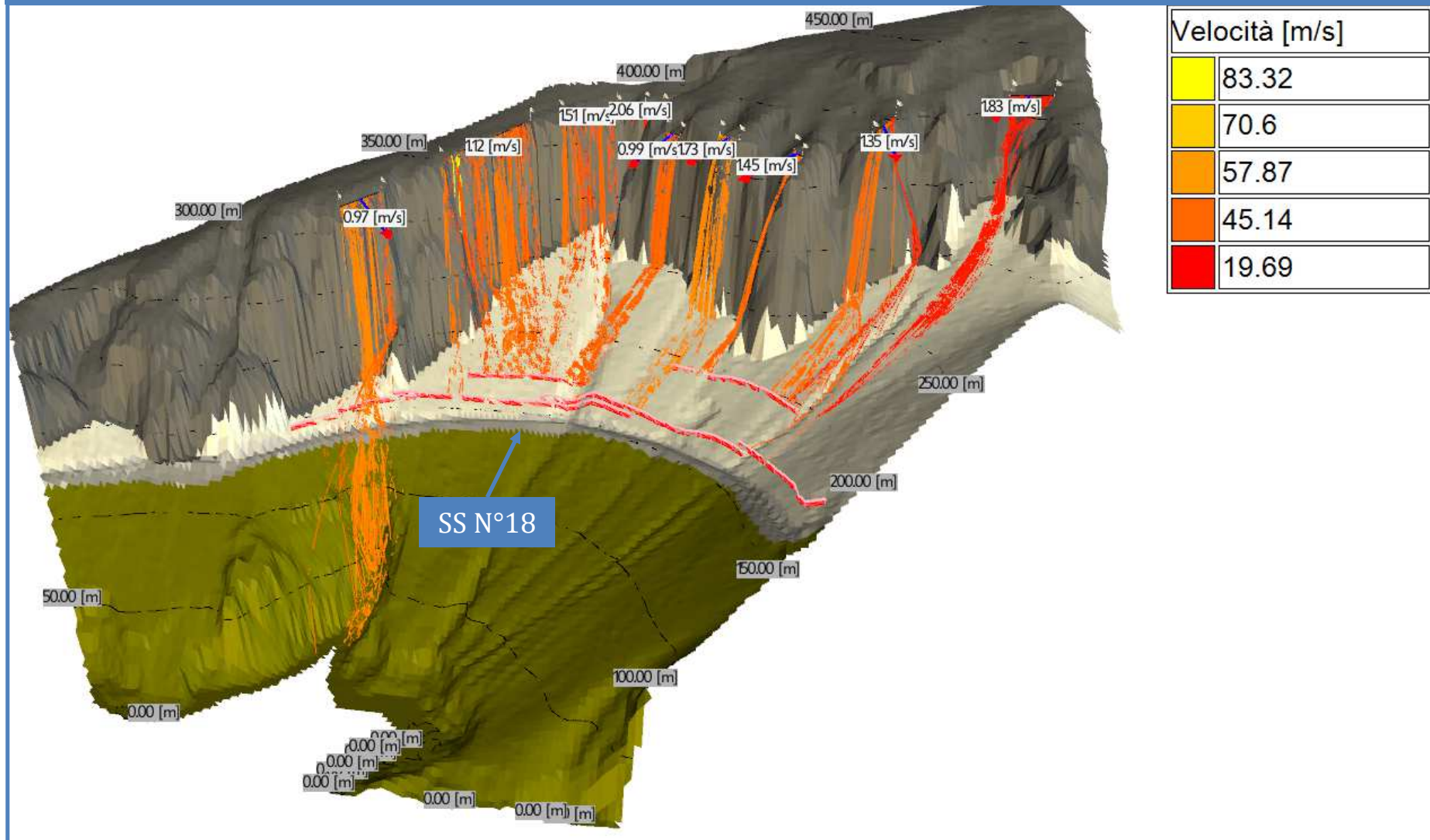


Fig.61: Distribuzione Velocità traiettorie 3D



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

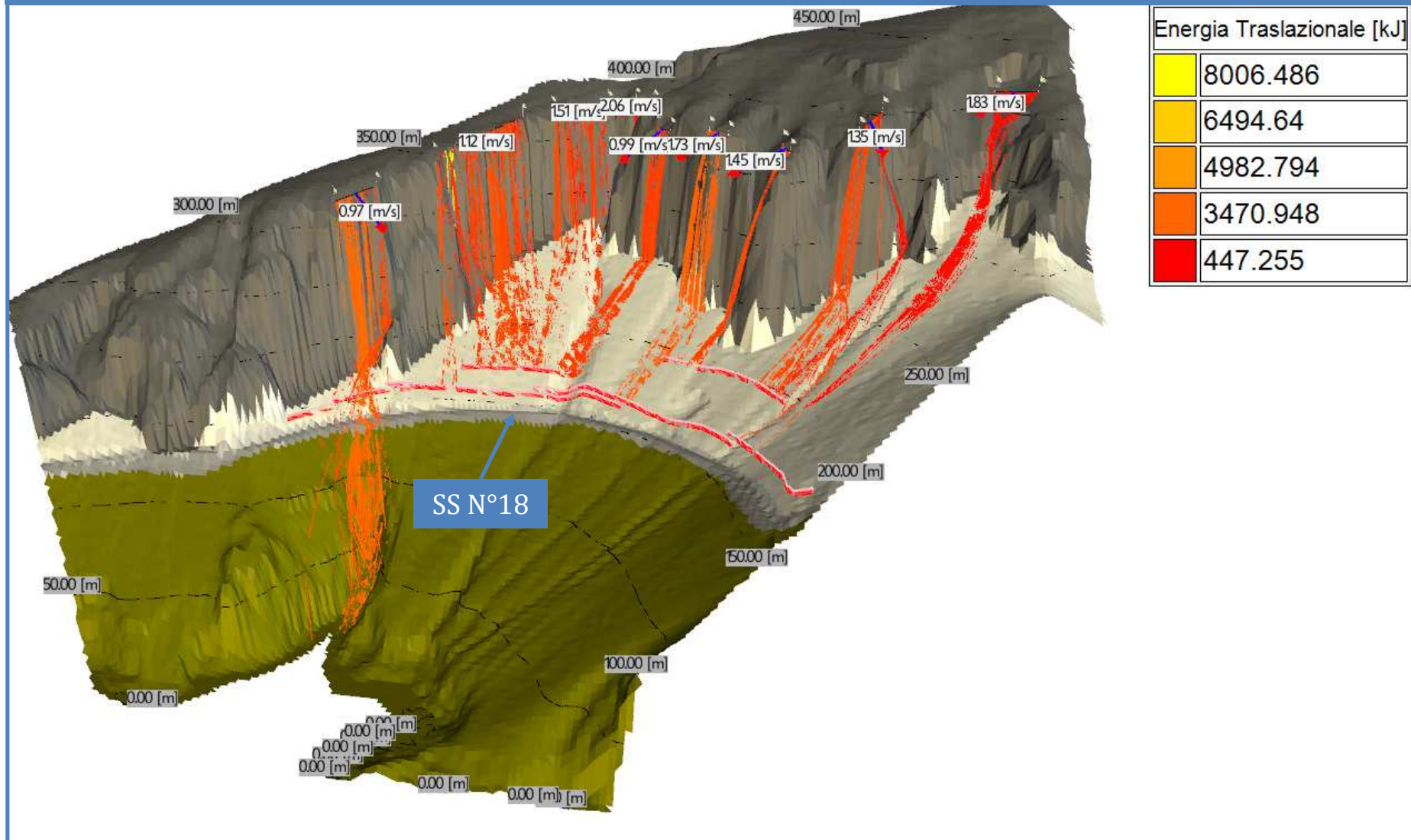


Fig.62: Distribuzione Energia traiettorie 3D



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 137

4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ*

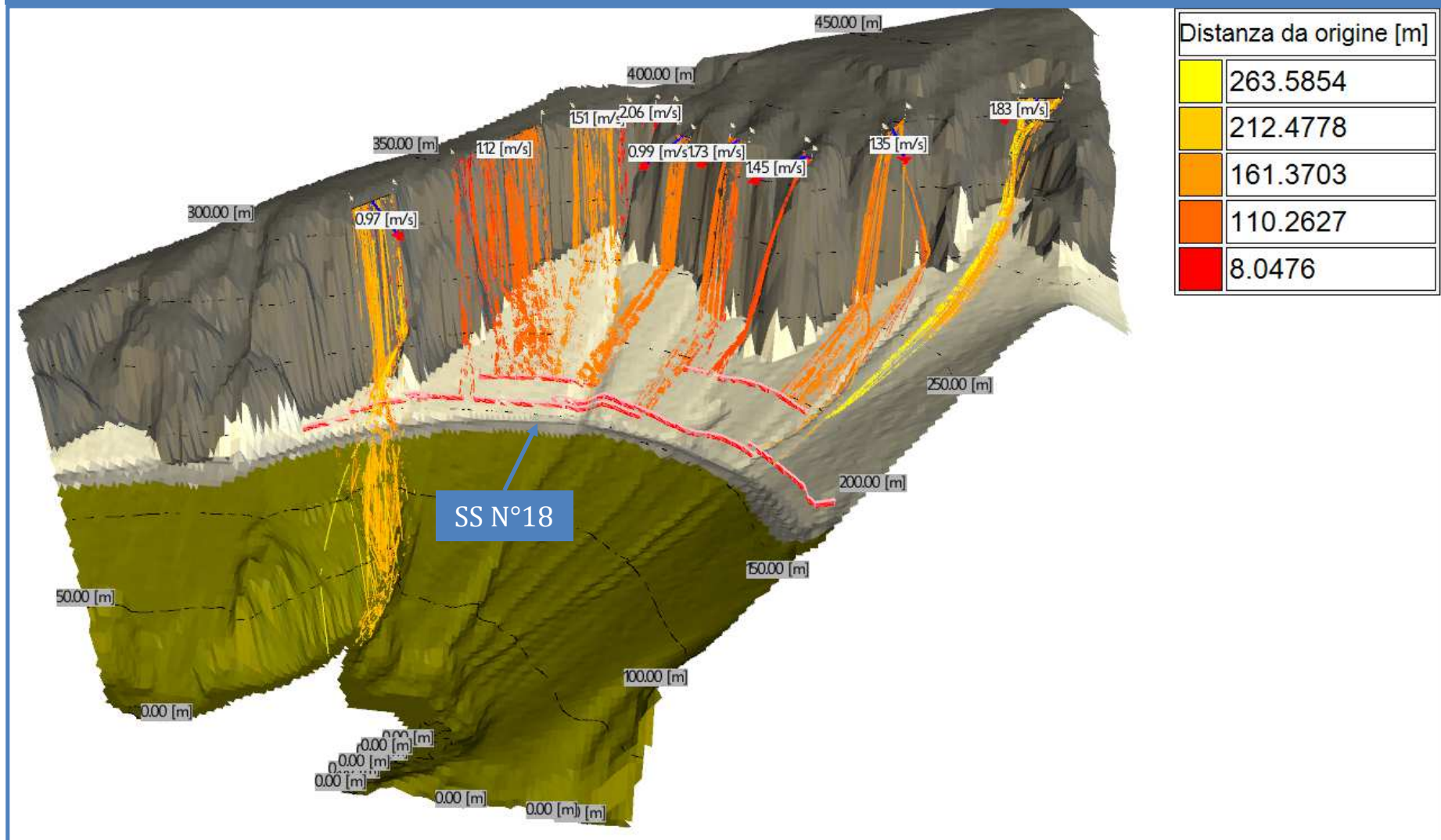


Fig.63: Distribuzione punti di arresto traiettorie 3D



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

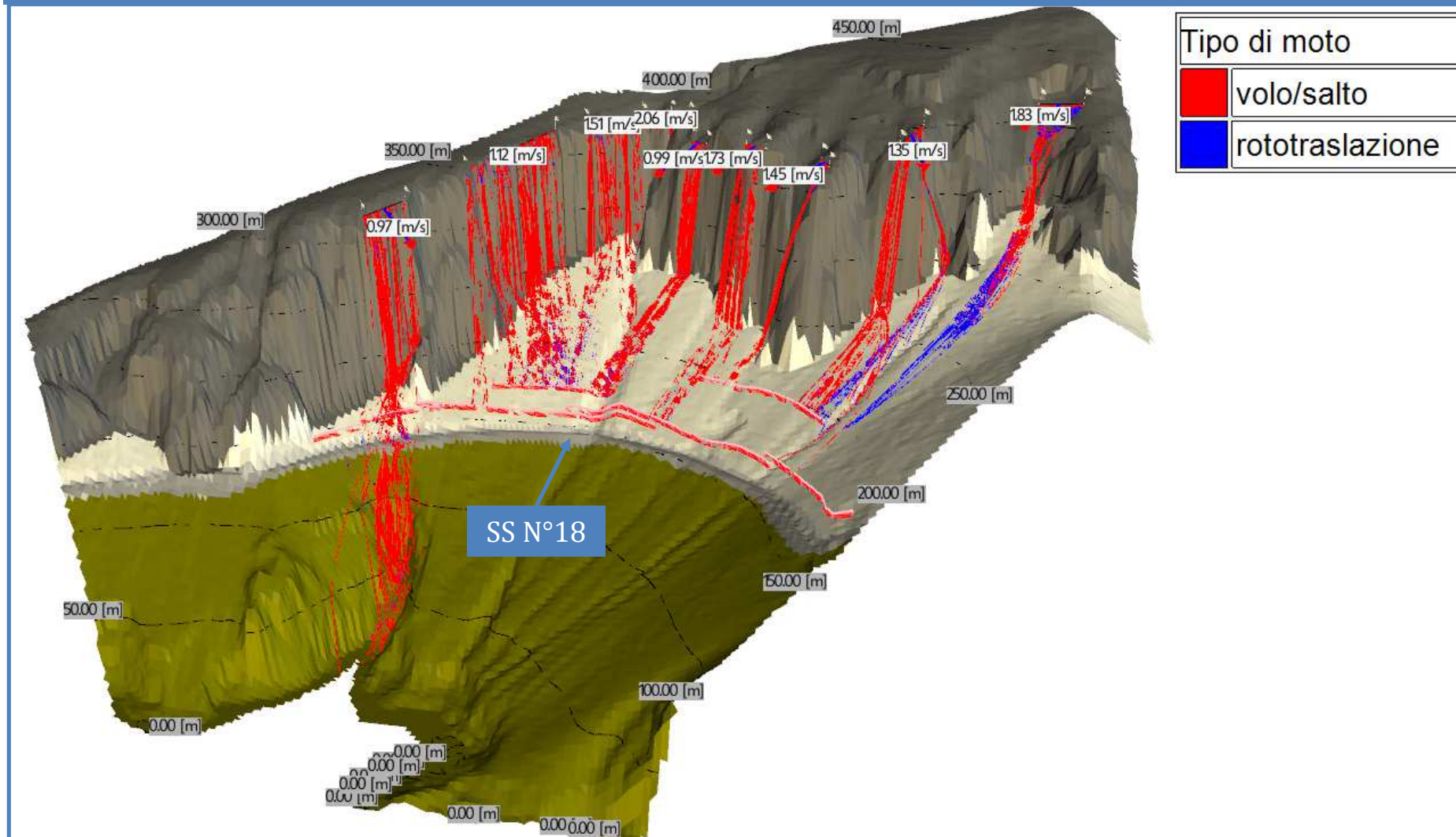


Fig.64: Tipologia di moto lungo le traiettorie



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

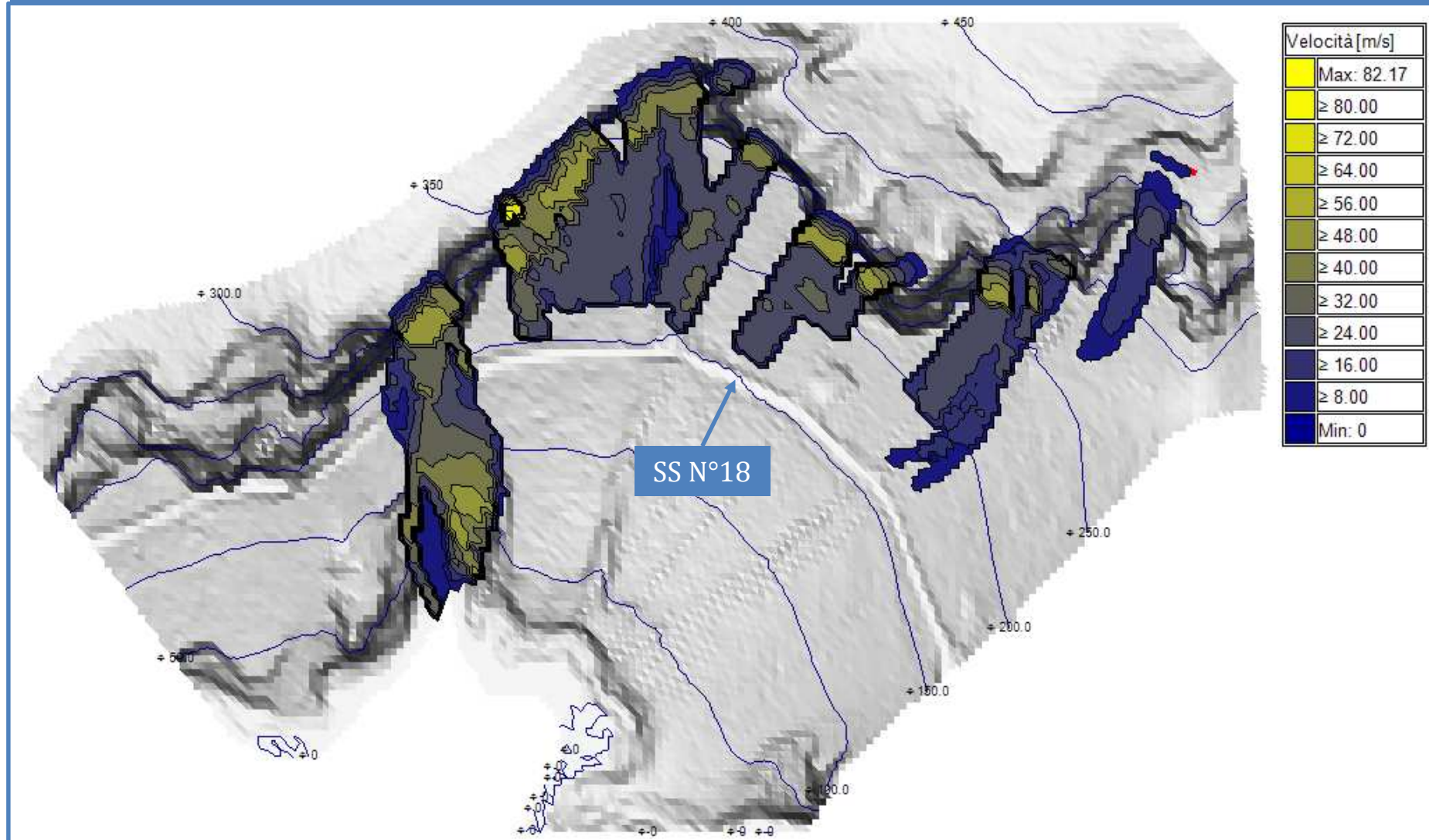


Fig.65: Mappe delle iso-velocità



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

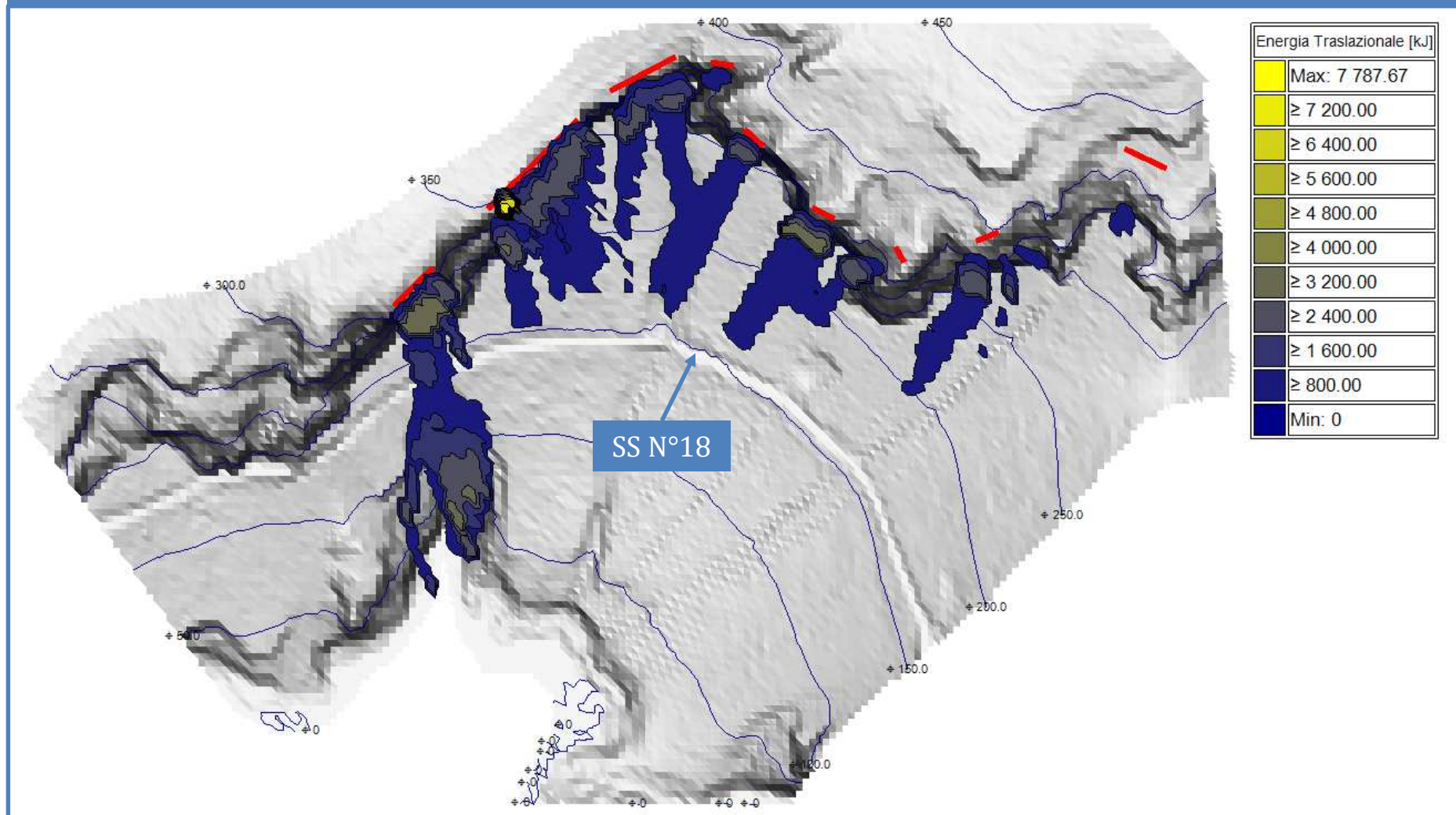


Fig.66: Mappe delle iso-energia



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

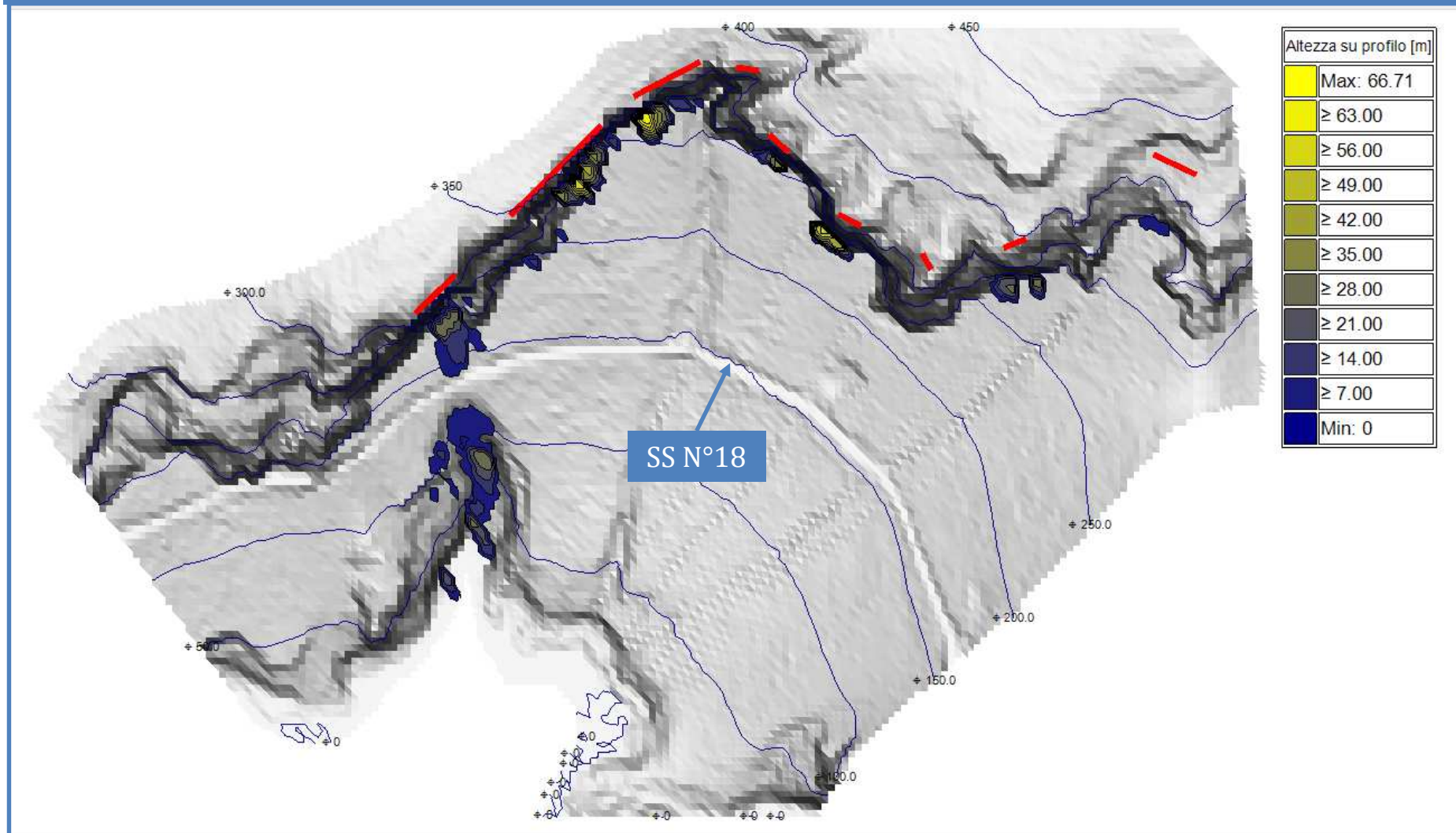


Fig.67: Mappe delle iso-altezza di volo sul profilo



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

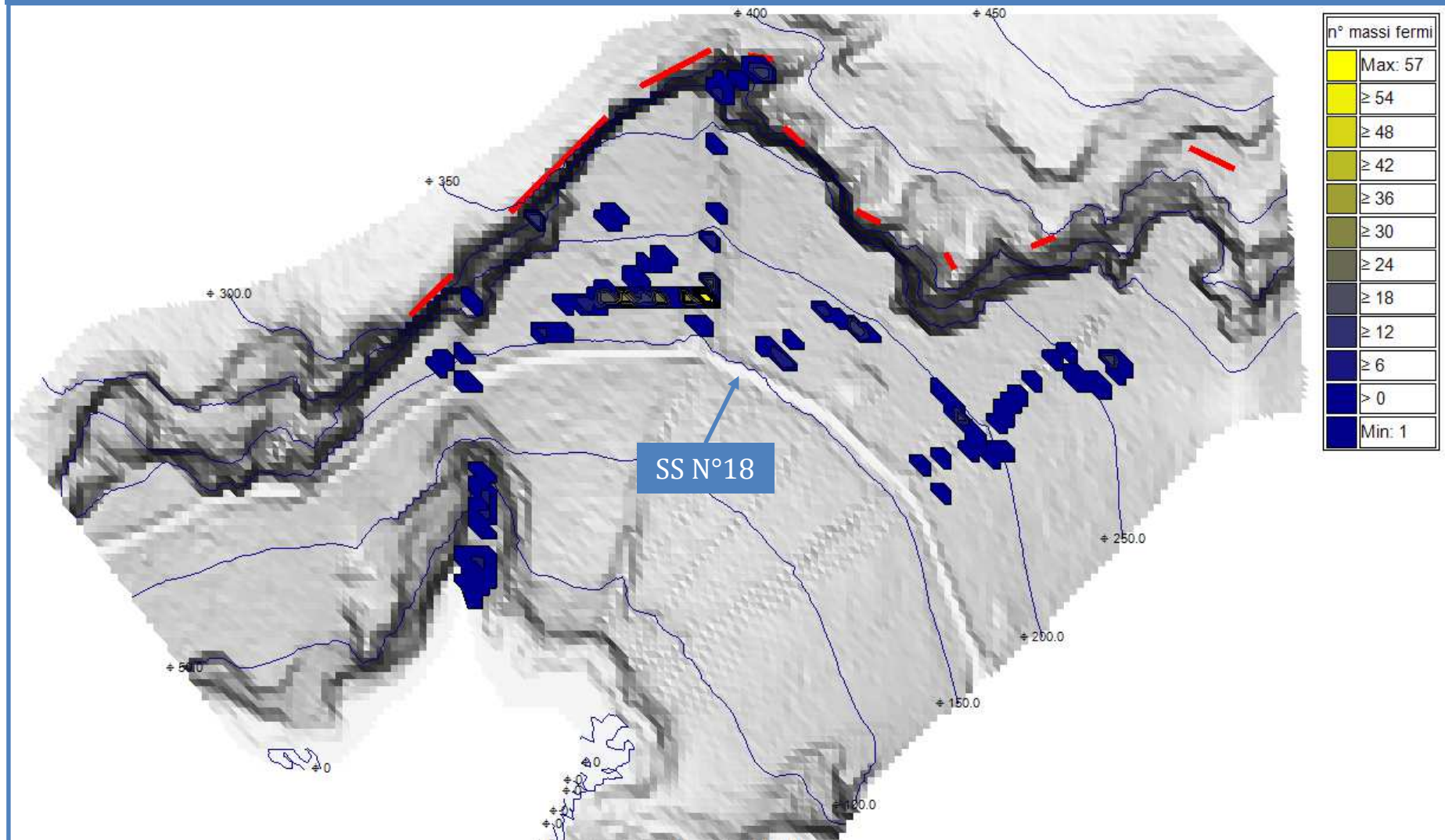
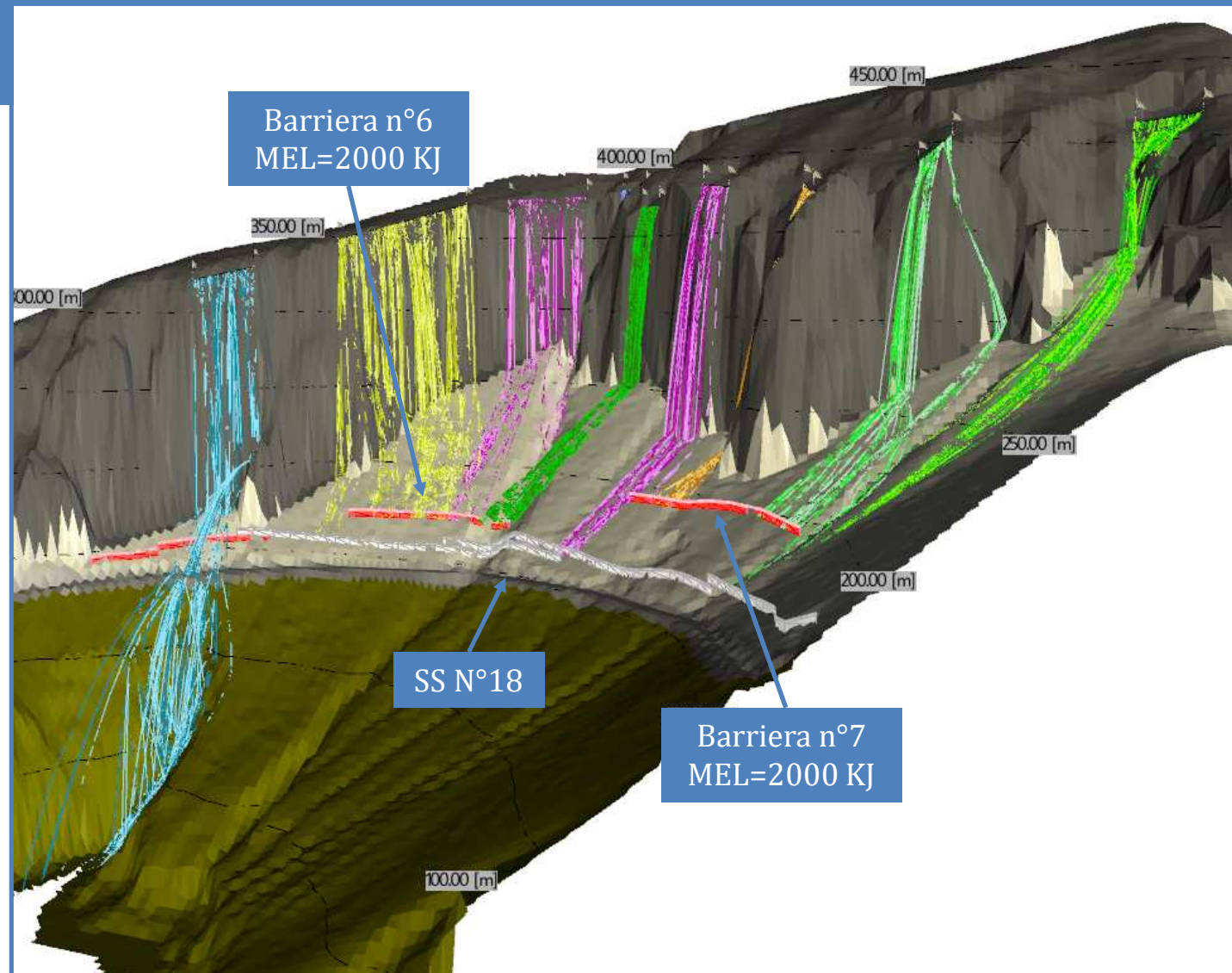


Fig.68: Mappe dei punti arresto blocchi transitati



4. PENDII IN ROCCIA : *Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva.* **Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ**

VERIFICHE BARRIERE
PARAMASSI



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 144

4. PENDII IN ROCCIA : Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ

VERIFICHE BARRIERE PARAMASSI – N°6

Tabella riassuntiva analisi statistica - Barriera 6 - Modulo 3

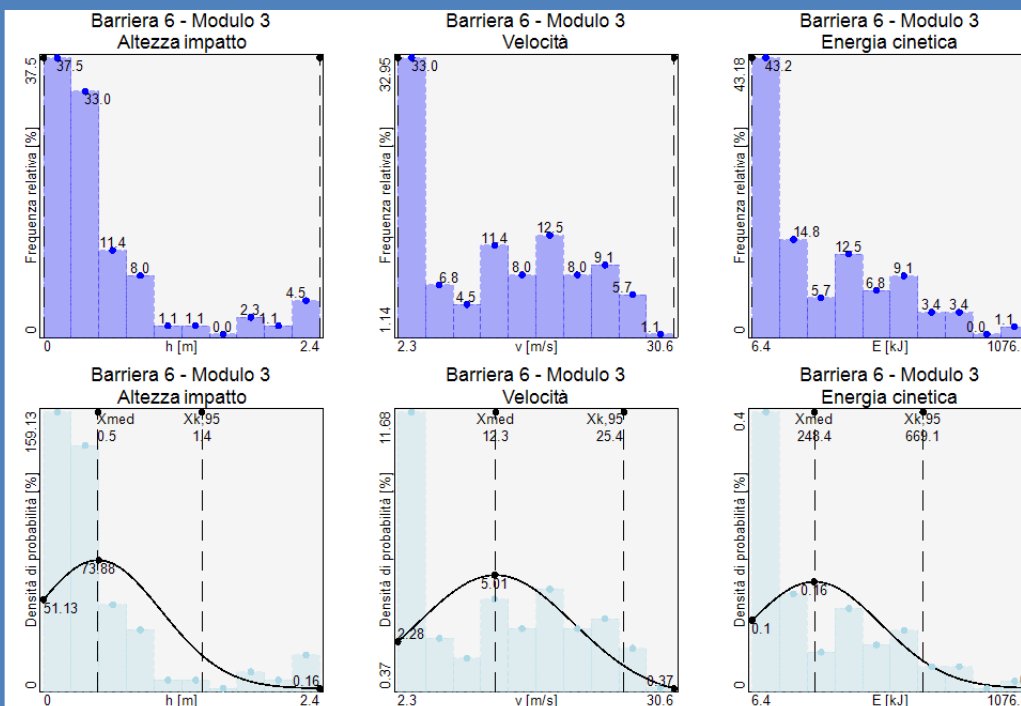
Analisi statistica - Numerosità campione = 88

	Altezza impatto [m]	Velocità impatto [m/s]	Energia impatto [kJ]
Minimo	0.0062	2.35	6.359
Massimo	2.3627	30.56	1076.762
Media	0.4695	12.33	248.444
Dev. standard	0.5399	7.96	255.933
95° percentile	1.357	25.42	669.134

Verifica barriera - Barriera 6 - Modulo 3

Analisi semiprobabilistica

Diametro del blocco [m]	D_{med}	1.2
Massa del blocco [kg]	M_{med}	2306.54
Energia traslazionale del blocco [kJ]	E_{95}	669.134
Altezza di impatto [m]	H_{95}	1.357
Coeff. rilievo topografia	γ_{rt}	1.00
Coeff. rilievo diametro blocchi	γ_{db}	1.00
Coeff. rilievo volume blocchi	γ_{vb}	1.00
Coeff. modello di calcolo	γ_{mo}	1.00
Coeff. energia impatto	γ_{ei}	1.00
D_d [m]	$D_{med} \gamma_{db}$	1.2
H_d [m]	$H_{95} \gamma_{rt} \gamma_{mo} + 0.5 D_d$	1.957
E_d [kJ]	$E_{95} \gamma_{rt} \gamma_{vb} \gamma_{ei} \gamma_{mo}$	669.134



Verifica barriera

Altezza nominale barriera [m]	H_b	5
Resistenza nominale barriera [kJ]	MEL_b	2000
Coeff. altezza barriera	γ_{ba}	1.00
Coeff. resistenza barriera	γ_{br}	1.00
$H_{b,d}$ [m]	H_b / γ_{ba}	$5 > 1.957$ OK
$MEL_{b,d}$ [kJ]	MEL_b / γ_{br}	$2000 > 669.134$ OK



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 145

4. PENDII IN ROCCIA : Frane da crollo in roccia: Cenni sulle analisi del moto ed opere di protezione passiva. Caso di Studio – Simulazione Acquafredda di Maratea -PZ

VERIFICHE BARRIERE PARAMASSI – N°7

Tabella riassuntiva analisi statistica - Barriera 7 - Modulo 2

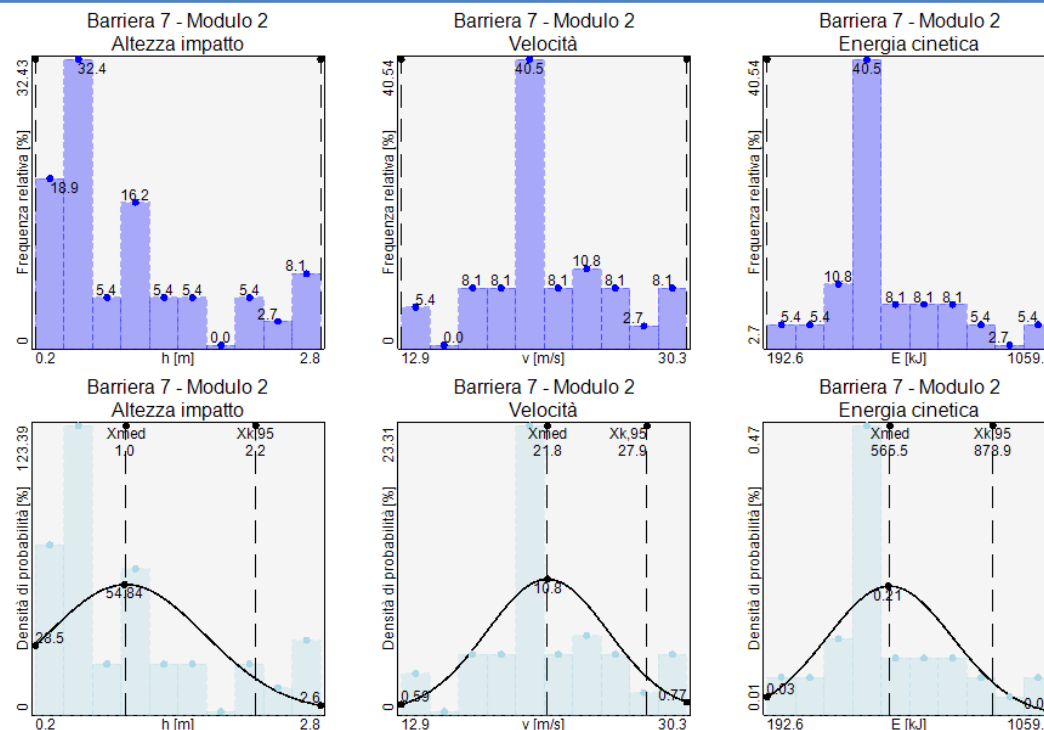
Analisi statistica - Numerosità campione = 37

	Altezza impatto [m]	Velocità impatto [m/s]	Energia impatto [kJ]
Minimo	0.1987	12.92	192.627
Massimo	2.8271	30.31	1059.697
Media	1.031	21.83	565.523
Dev. standard	0.7274	3.69	190.626
95° percentile	2.2267	27.9	878.865

Verifica barriera - Barriera 7 - Modulo 2

Analisi semiprobabilistica

Diametro del blocco [m]	D_{med}	1.2
Massa del blocco [kg]	M_{med}	2306.54
Energia traslazionale del blocco [kJ]	E_{95}	878.865
Altezza di impatto [m]	H_{95}	2.2267
Coeff. rilievo topografia	γ_{rt}	1.00
Coeff. rilievo diametro blocchi	γ_{db}	1.00
Coeff. rilievo volume blocchi	γ_{vb}	1.00
Coeff. modello di calcolo	γ_{mo}	1.00
Coeff. energia impatto	γ_{ei}	1.00
D_d [m]	$D_{med} \gamma_{db}$	1.2
H_d [m]	$H_{95} \gamma_{rt} \gamma_{mo} + 0.5 D_d$	2.8267
E_d [kJ]	$E_{95} \gamma_{rt} \gamma_{vb} \gamma_{ei} \gamma_{mo}$	878.865



Verifica barriera

Altezza nominale barriera [m]	H_b	5
Resistenza nominale barriera [kJ]	MEL_b	2000
Coeff. altezza barriera	γ_{ba}	1.00
Coeff. resistenza barriera	γ_{br}	1.00
$H_{b,d}$ [m]	H_b / γ_{ba}	$5 > 2.8267$ OK
$MEL_{b,d}$ [kJ]	MEL_b / γ_{br}	$2000 > 878.865$ OK



Dott. Ing. OLIVETO Francesco

CORSO: Meccanica delle Frane e Metodologie di Consolidamento

23 Settembre 2017

pag. 146