



Ordine degli Ingegneri
della Provincia
di Roma

Frane su versanti rocciosi in condizioni sismiche. Metodi di analisi e casi di studio

Ing. Luca Verrucci



Frane su versanti rocciosi in condizioni sismiche

1. Le **frane in roccia** provocate da eventi sismici
2. Le frane da **scivolamento** in roccia provocate da eventi sismici
3. La **risposta sismica** locale di pareti rocciose subverticali
4. Le **azioni inerziali** su blocchi rocciosi
5. Le **verifiche** con forza pseudostatica

Ipotesi:

- rottura primaria
- blocchi rigidi
- movimento traslativo
- duttilità (resistenza costante)
- assenza di pressioni idrauliche

Obiettivi:

- focus su meccanismi
- focus su metodi di verifica
- riflessioni sulla normativa

1. Le frane in roccia provocate da eventi sismici
2. Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici
3. La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali
4. Le azioni inerziali su blocchi rocciosi
5. Le verifiche con forza pseudostatica

Le frane in roccia provocate da eventi sismici

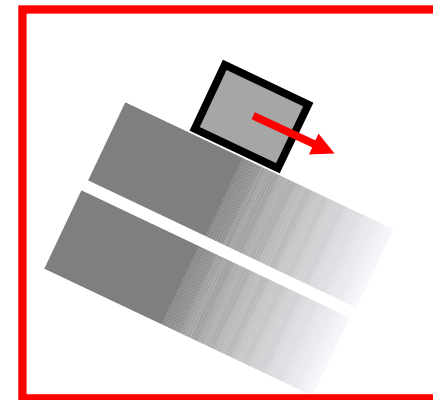
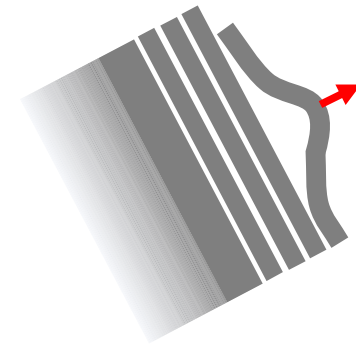
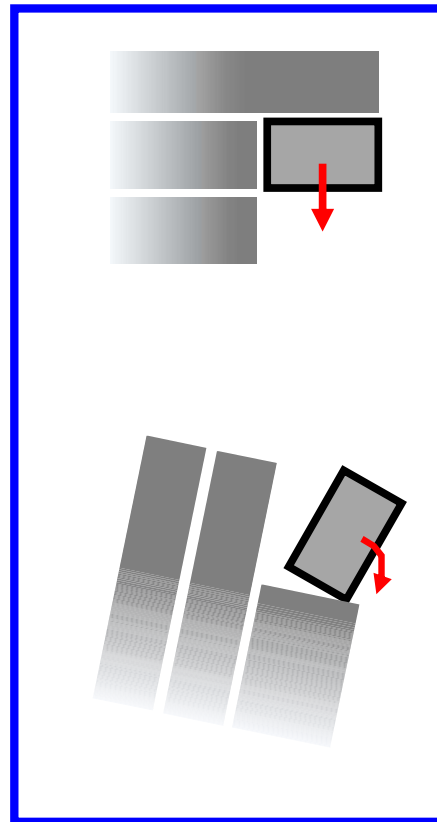
Nella fase di rottura tutti i **tipi di instabilità** di blocchi rocciosi possono essere provocati/riattivati da terremoti

- distacchi per trazione o flessione
- buckling
- ribaltamenti
- scivolamenti

La **struttura dell'ammasso**
è fattore fondamentale e predisponente

La rottura per distacco e per ribaltamento
è molto frequente per volumi medio-piccoli

La rottura per scivolamento è molto diffusa
anche per fenomeni di media-grande scala



1. Le frane in roccia provocate da eventi sismici
- 2. Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici**
3. La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali
4. Le azioni inerziali su blocchi rigidi
5. Le verifiche con forza pseudostatica

Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

- Grandi scivolamenti provocati da terremoti:
- volumi che non si muovono rigidamente
- complessi modelli di resistenza
- rilevanza delle pressioni interstiziali
- terremoti di grande energia

Daguangbao rockslide

$750 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

terremoto di Wenchuan (2008, $M_W=7.9$)

cuneo in calcari con interstrati marnosi

Huang et al. (2012)



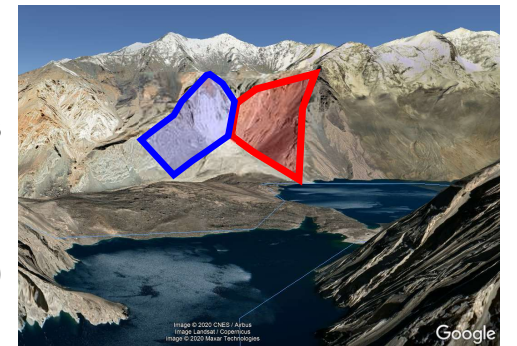
Usoi Dam rockslide

$2000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

terremoto del Pamir (1911, $M_W=7.4$)

cuneo in calcari / arenarie-scisti

Evans et al. (2002)



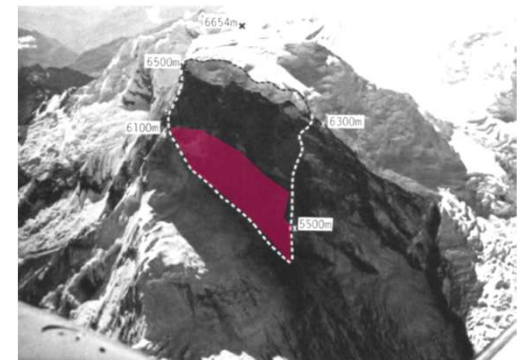
Nevados Huascaran rockslide

$75 \cdot 10^6 \text{ m}^3$

terremoto del Pacifico (1970, $M_W=7.7$)

scivolamento planare in granodioriti alterate

Plafker G. & Ericksen G. E., (1978)



Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Scivolamenti in roccia

della sequenza sismica dell'Italia Centrale

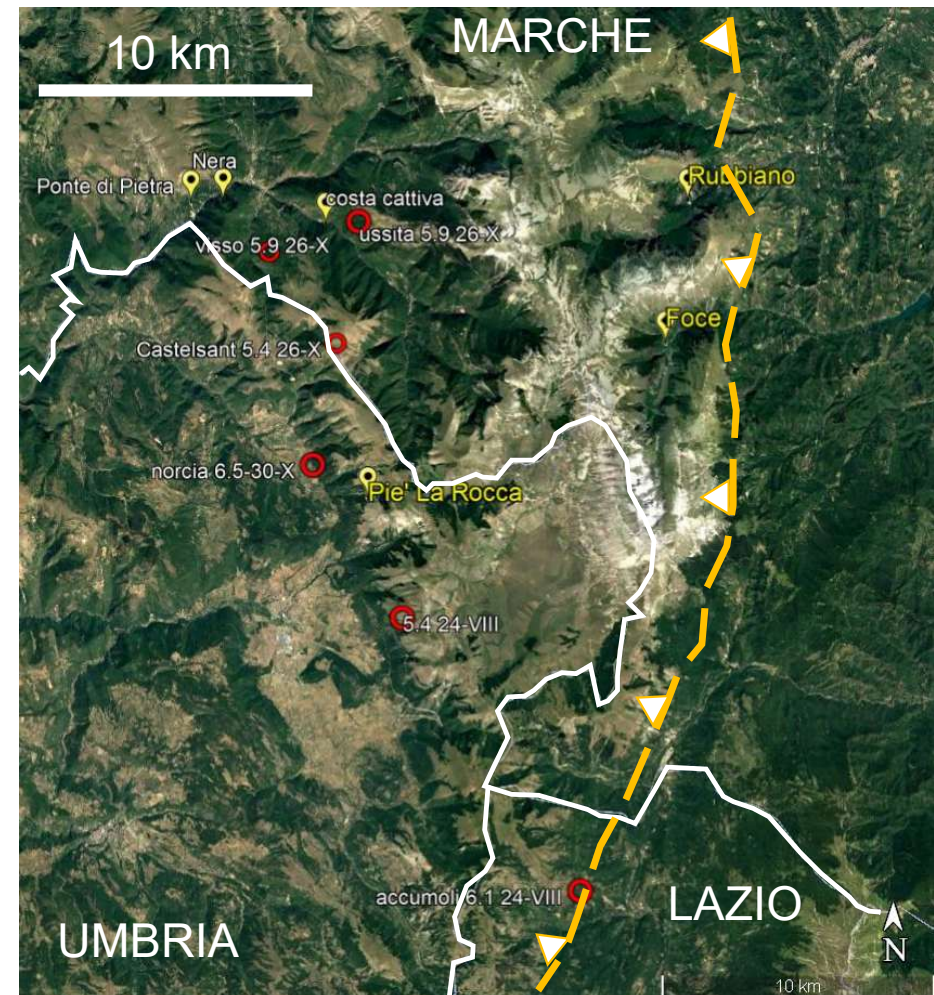
(agosto 2016 – gennaio 2017)

Calcari e calcari marnosi nell'area dei Monti Sibillini

Indagini:

- Ricognizione da foto satellitari
- Rilievi diretti sulle superfici di scorrimento
- Rilievi fotogrammetrici UAV
- Prove di laboratorio

(GEER, 2016 e 2017, Tommasi et al., 2017)

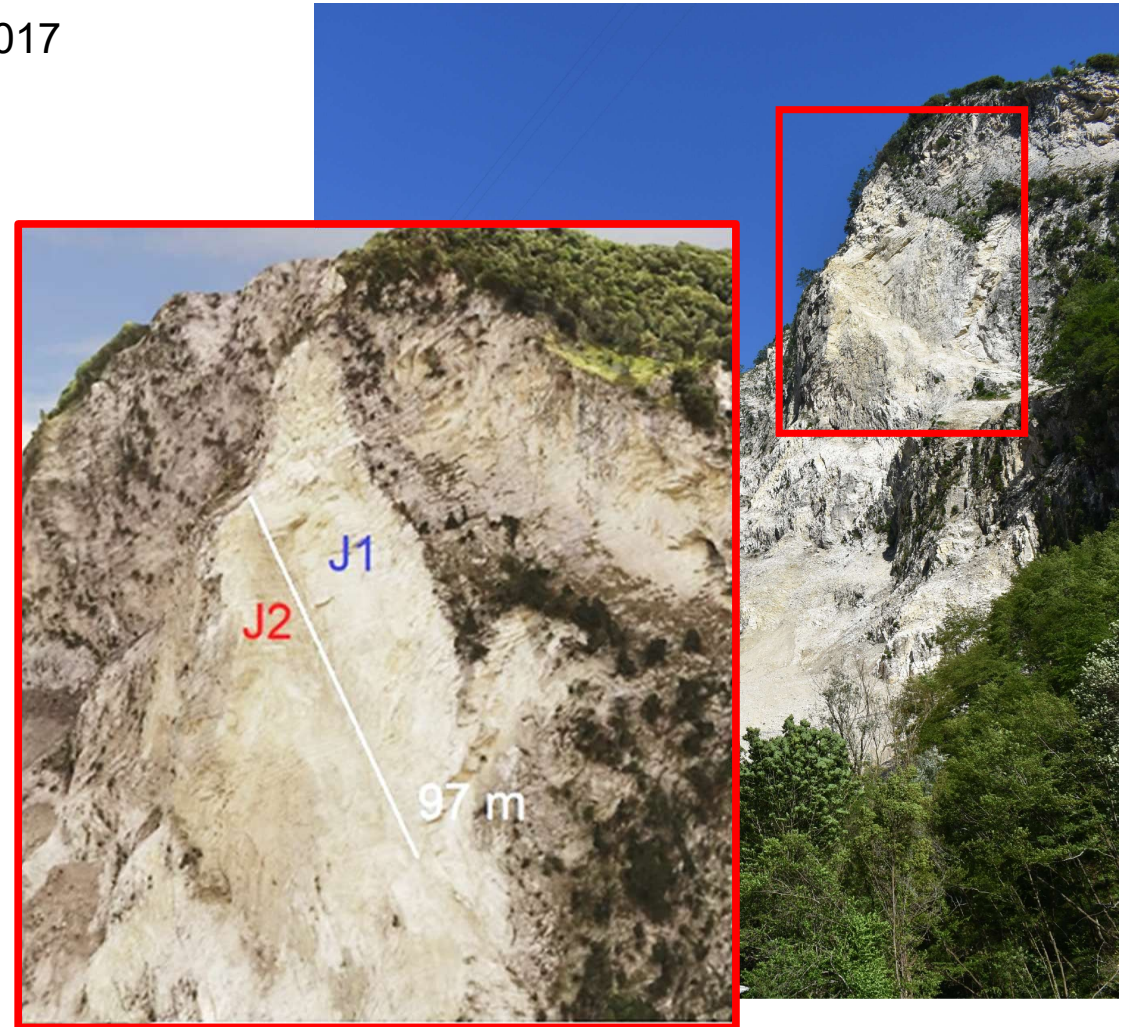
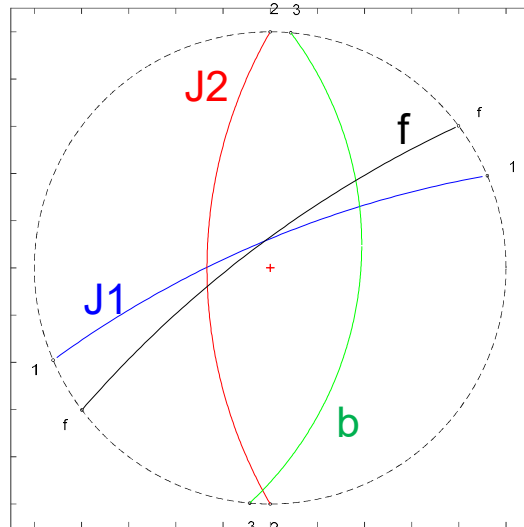


Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Scivolamenti del sisma dell'Italia Centrale 2016-2017

Monte Pizzuto (gole del Nera)

- 30 000 m³
- calcare (Maiolica)
- sbarramento del Nera e interruzione SP209
- due famiglie di discontinuità
- componente coesiva determinante
- doppio cuneo (?)



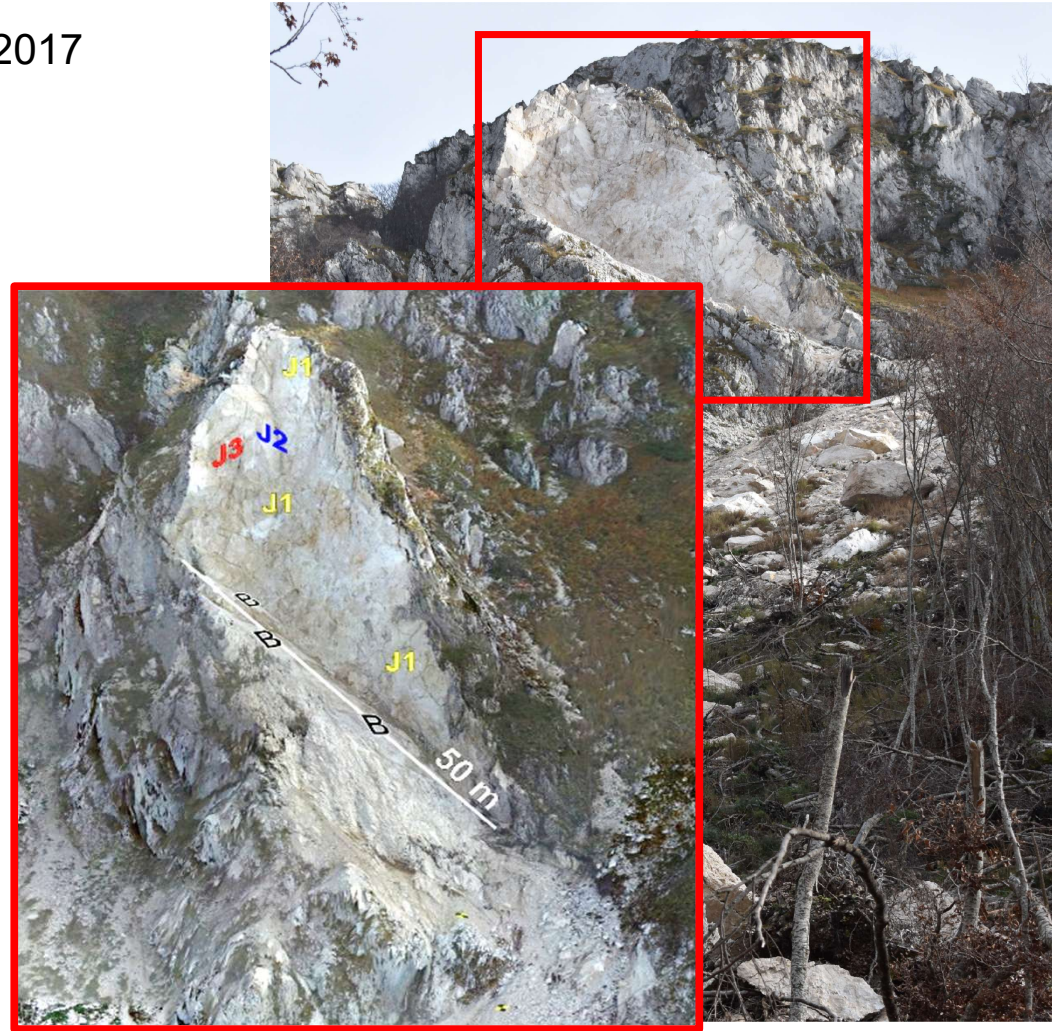
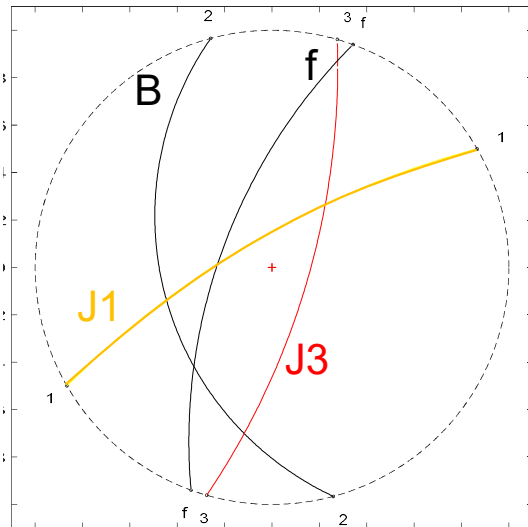
Forte et al. (2021)
Verrucci et al. (2023)

Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Scivolamenti del sisma dell'Italia Centrale 2016-2017

Monte Patino (Piè la Rocca - Norcia)

- 15 000 m³
- calcare stratificato (Calcare Massiccio)
- stratificazione e una famiglia di discontinuità

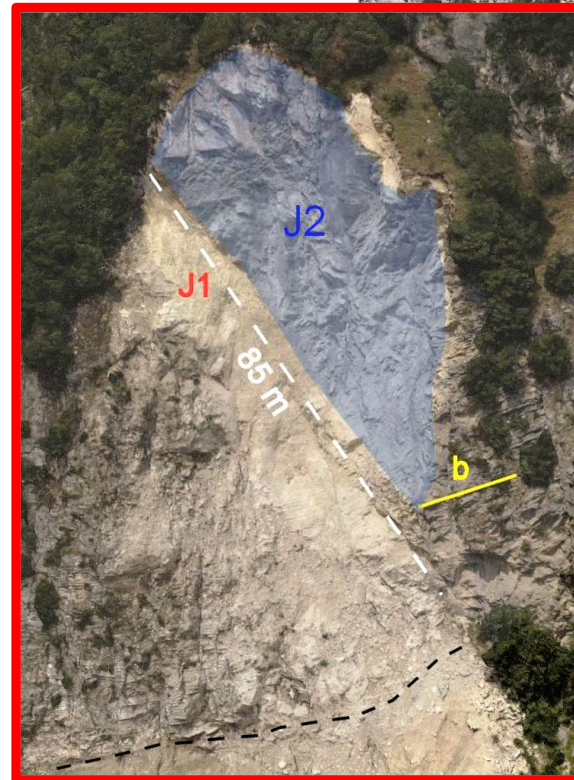
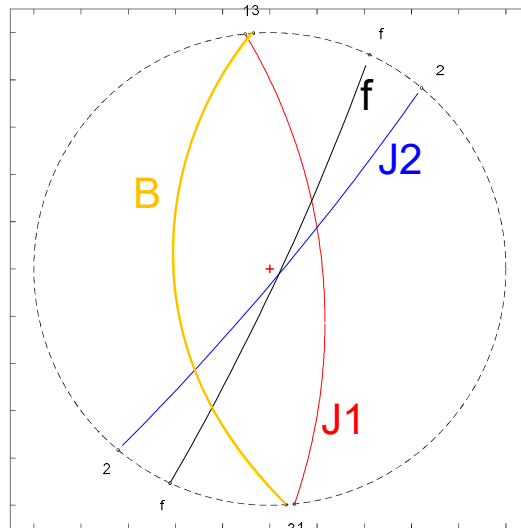


Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Scivolamenti del sisma dell'Italia Centrale 2016-2017

Rubbiano

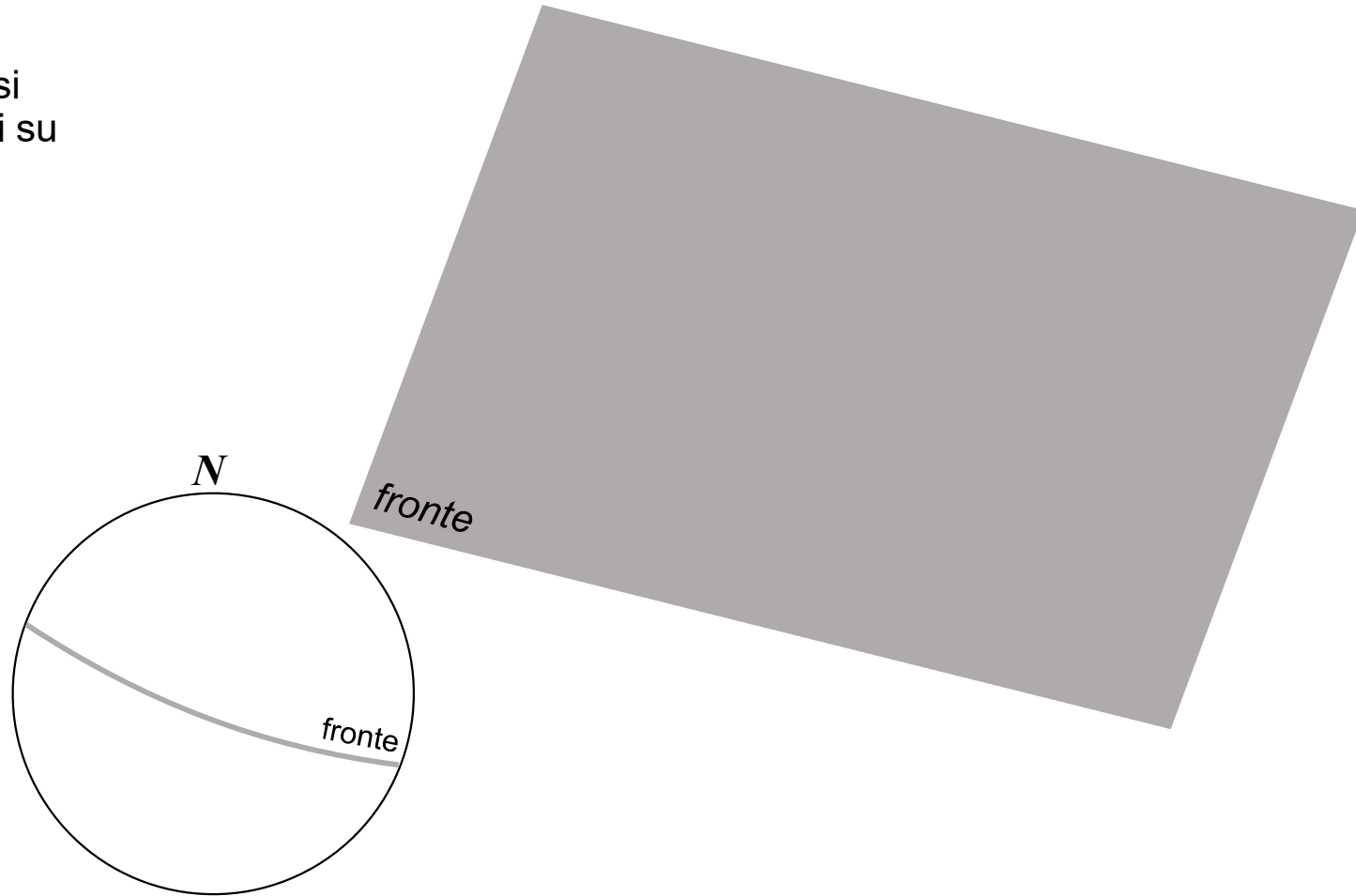
- 15 000 m³
- calcare (Maiolica)
- una famiglia di discontinuità ed una superficie di distacco composta da diverse giaciture



Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Scivolamenti del sisma dell'Italia Centrale
2016-2017

Alcuni tratti comuni della struttura che si
associa alla formazione di scivolamenti su
fronti rocciosi:



Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

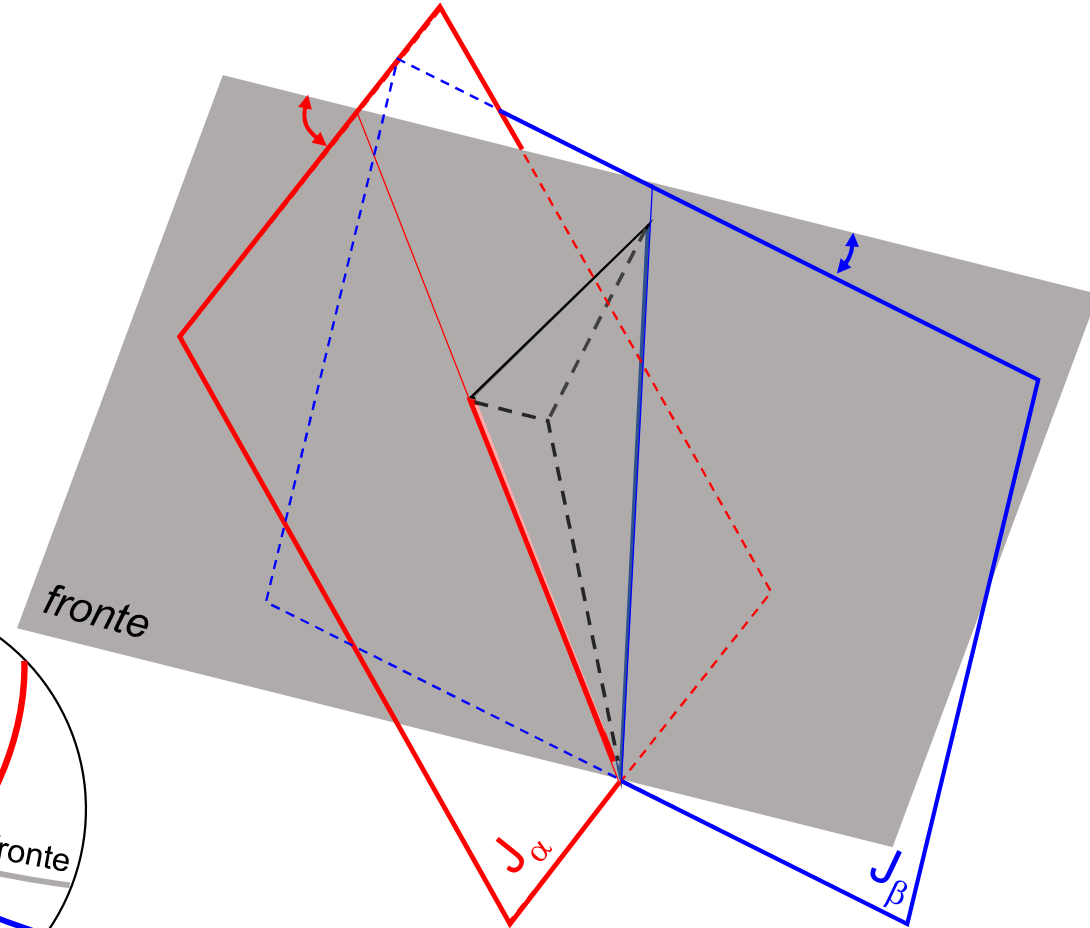
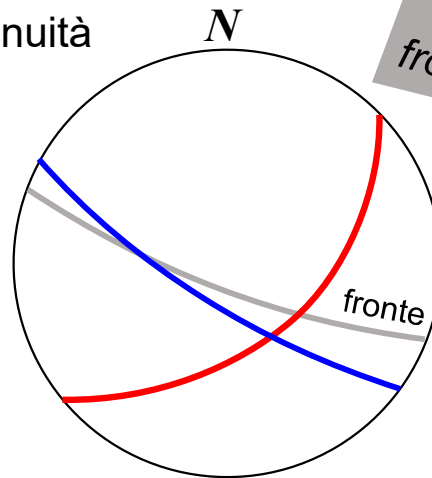
Scivolamenti del sisma dell'Italia Centrale
2016-2017

Alcuni tratti comuni della struttura che si
associa alla formazione di scivolamenti su
fronti rocciosi:

- J_α , superficie variamente inclinata e
intersecante il fronte con alto angolo
- J_β , superficie subverticale e con direzione
poco differente da quella del fronte
- eventuale terza famiglia di discontinuità
che permette il distacco

lo scivolamento avviene:

- lungo la retta ma con una forza di
reazione molto bassa su J_β
- solo su J_α

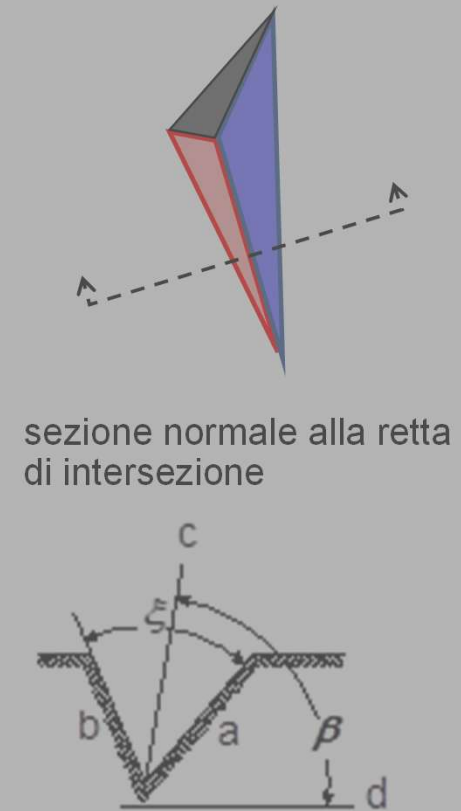
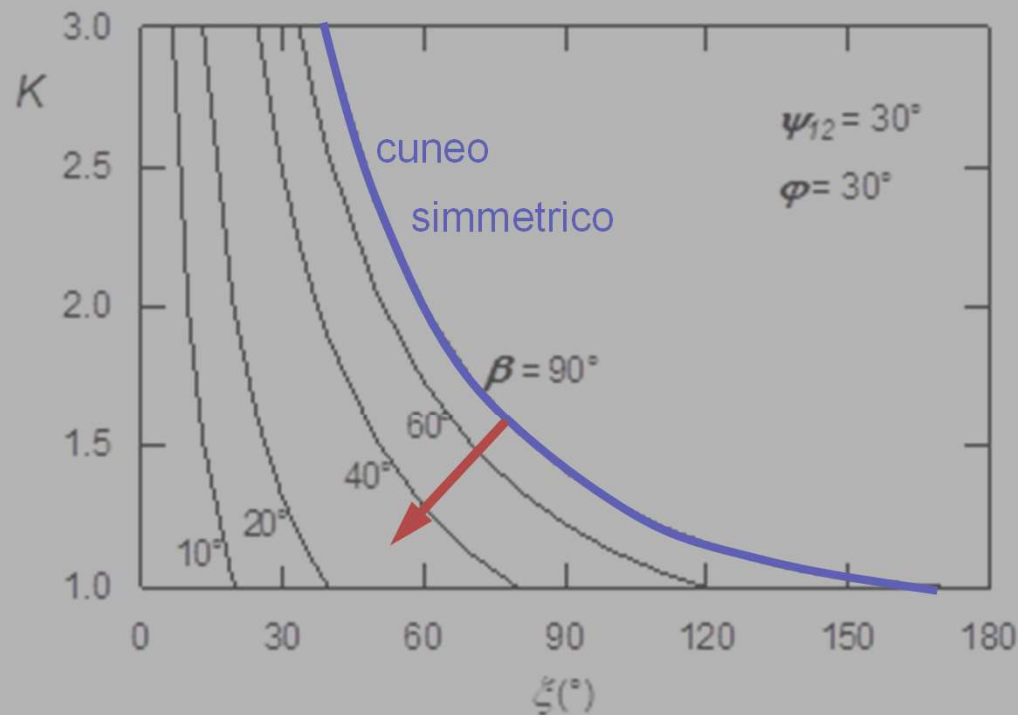


Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Influenza dell'asimmetria del cuneo sul fattore di sicurezza statico (Ribacchi et al., 2018):

- solo forza peso
- solo resistenza attritiva uguale su entrambi i piani

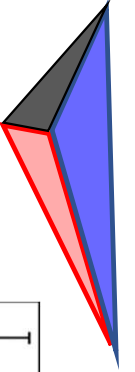
$$F_s = K \frac{\operatorname{tg} \varphi}{\operatorname{tg} \psi_{12}}$$



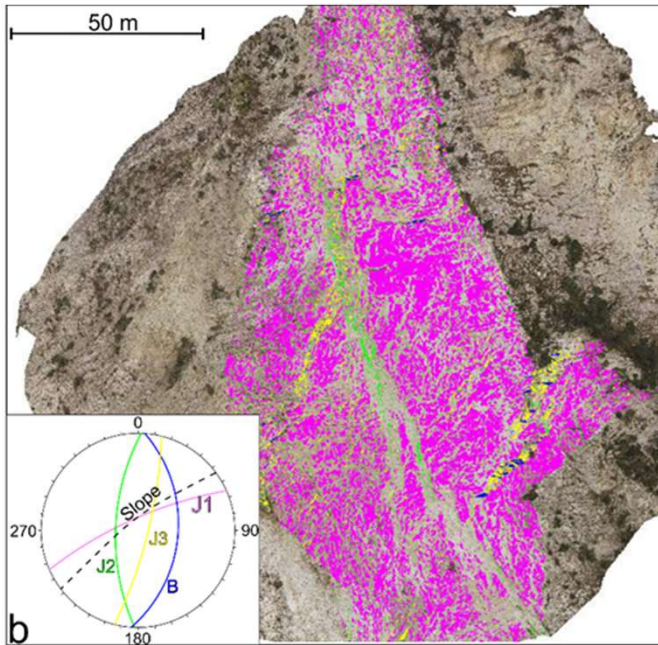
Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici

Scivolamenti del sisma dell'Italia Centrale 2016-2017

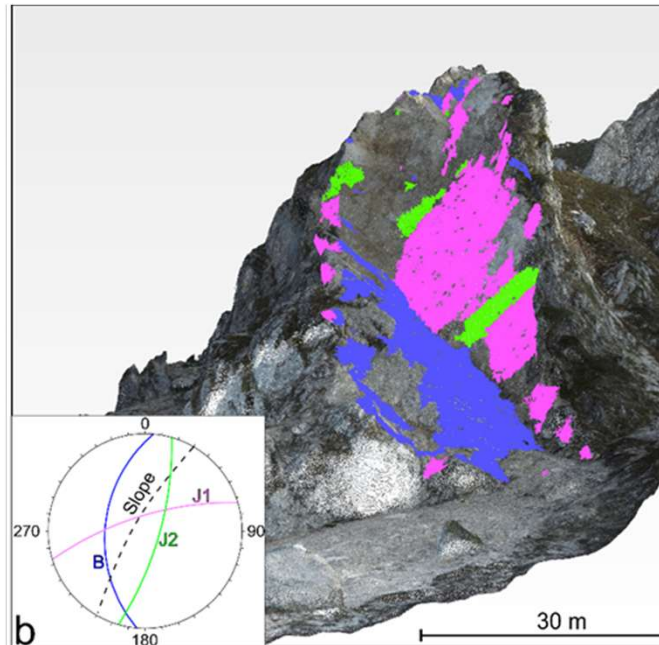
- Riconoscimento dei piani di scivolamento/distacco da rilievi fotogrammetrici delle pareti
- Stima delle porzioni di superficie oggetto di nuove rotture



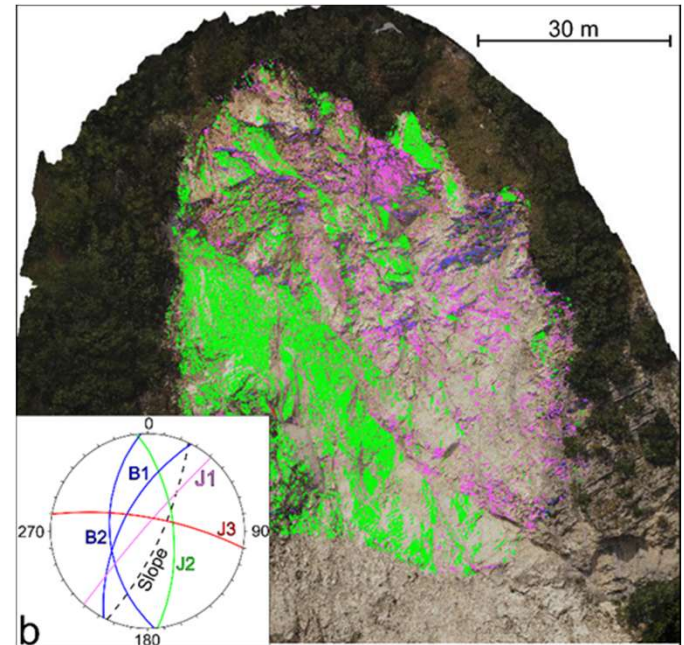
Nera



Piè la Rocca



Rubbiano



(Forte et al., 2020)

1. Le frane in roccia provocate da eventi sismici
2. Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici
- 3. La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali**
4. Le azioni inerziali su blocchi rigidi
5. Le verifiche con forza pseudostatica

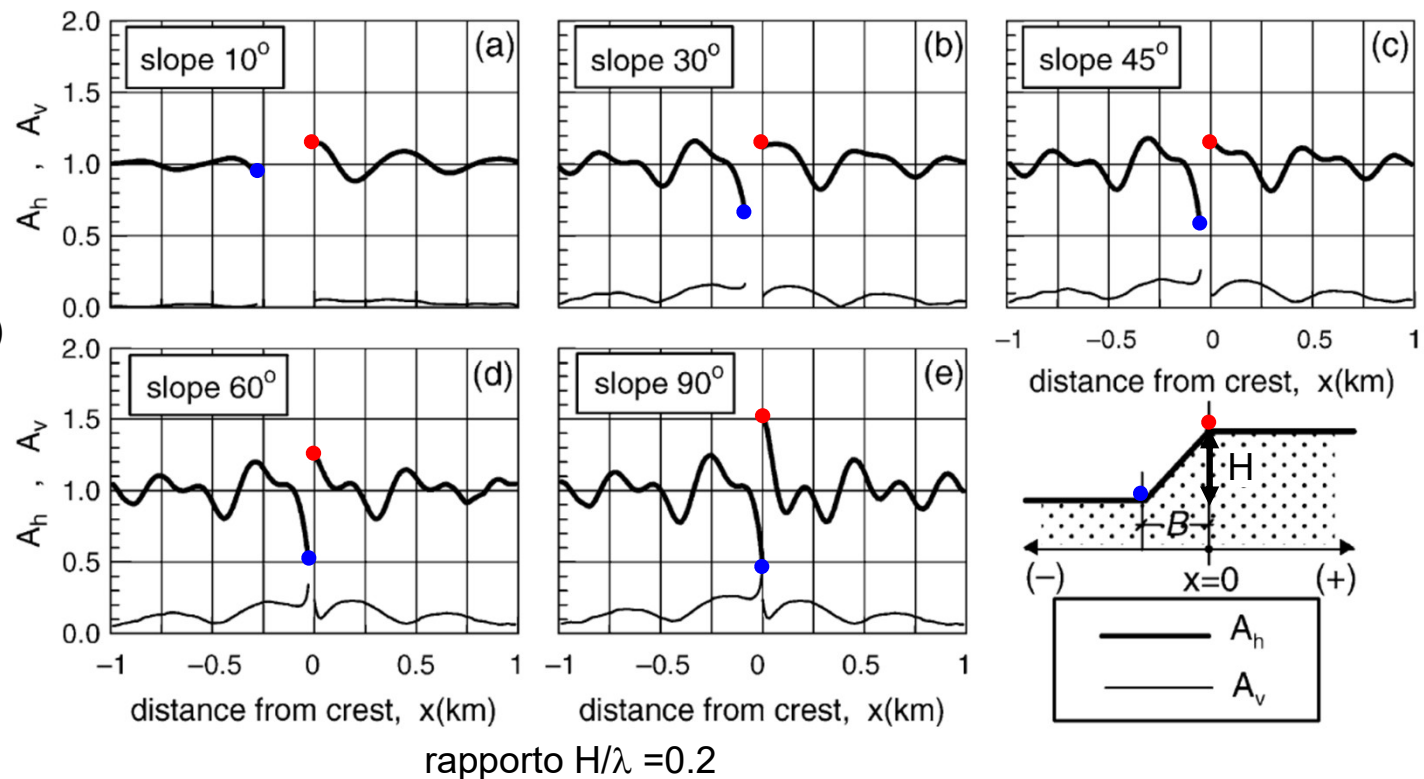
La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali

La modifica del moto (rispetto all'affioramento del substrato rigido orizzontale) è influenzato da:

- contrasti di impedenza per condizioni stratigrafiche / tettoniche / fratturazione
- morfologia

La amplificazione in prossimità di un pendio è già studiata da :

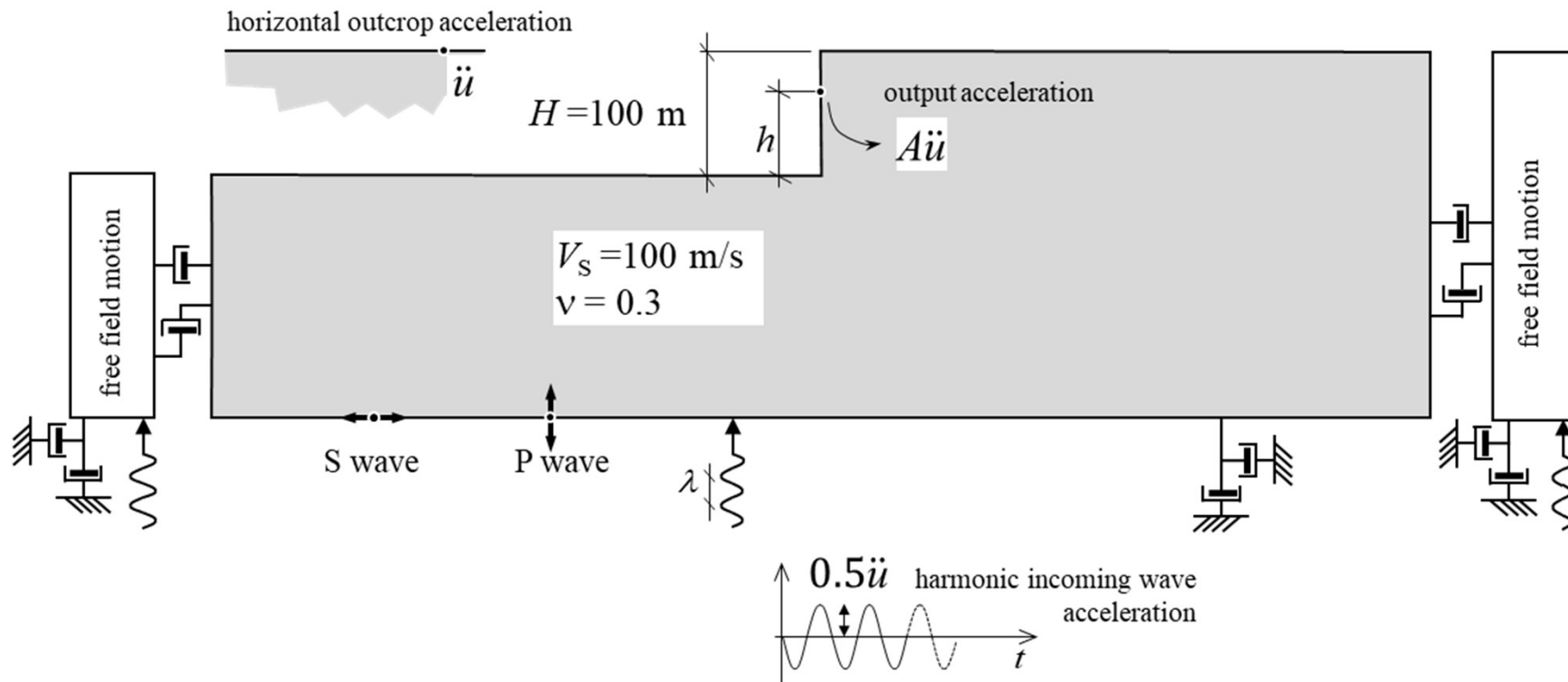
- Ashford e Sitar (1997)
- Bouckovalas e Papadimitriou (2005)
- amplificazione in cresta
- deamplificazione al piede



La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali

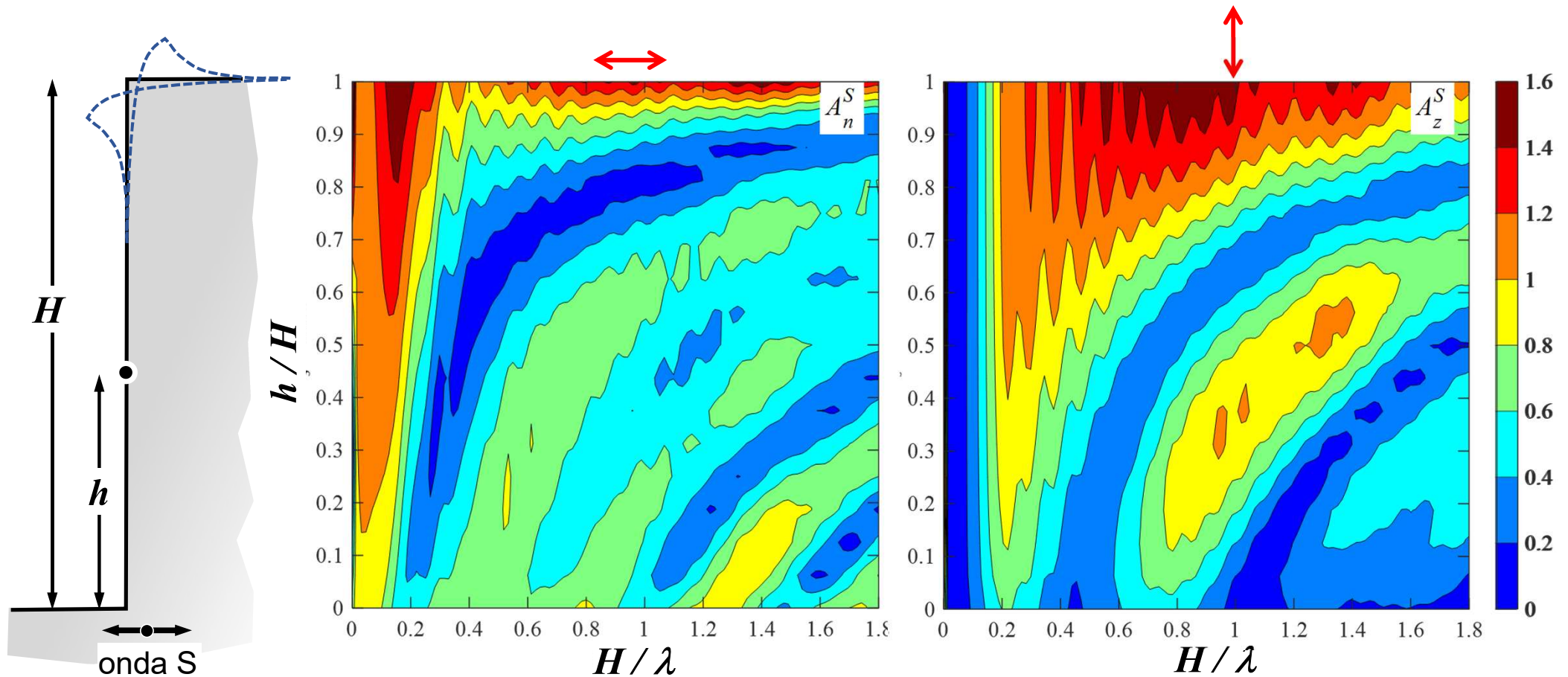
Analisi numeriche visco-elastiche di un versante a gradone ($i = 90^\circ$)

(sono escluse amplificazioni per morfologie locali)



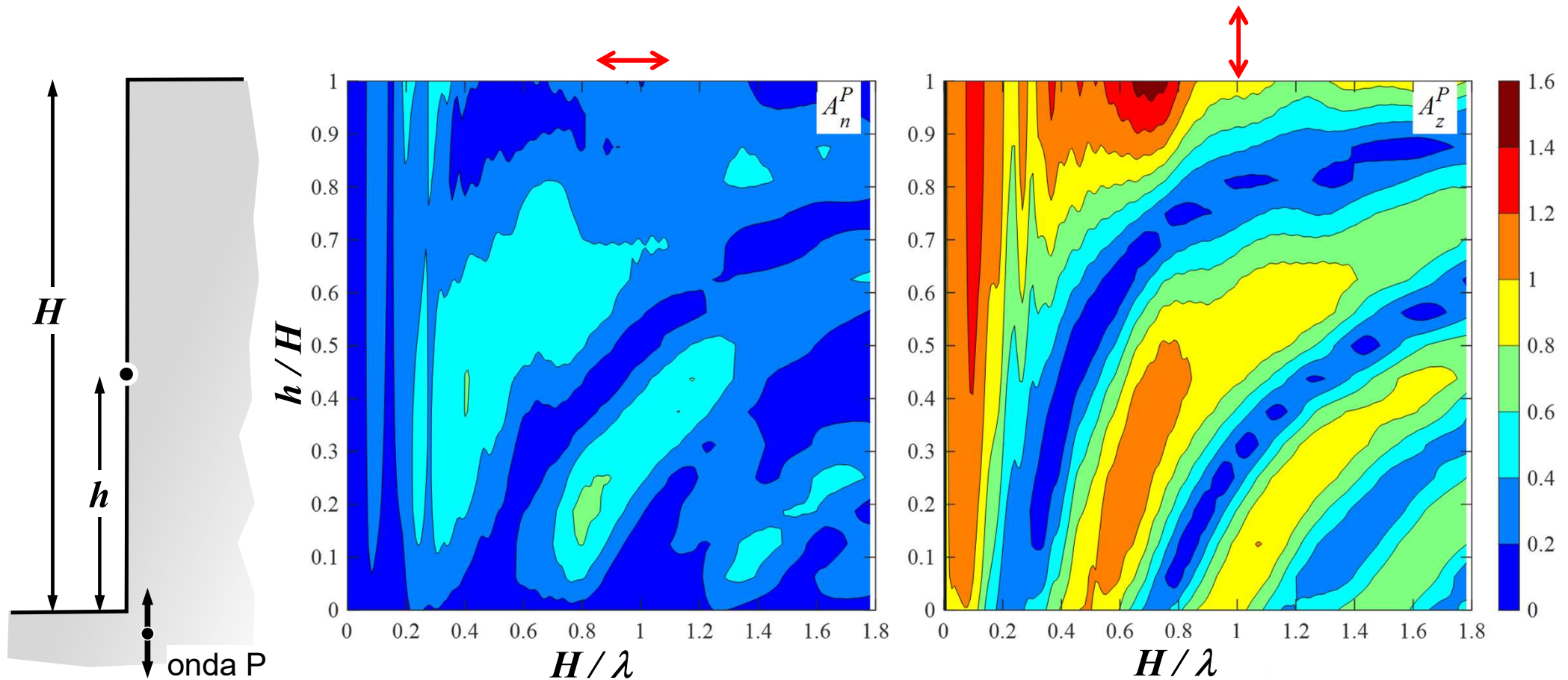
La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali

Analisi numeriche visco-elastiche di un versante a gradone ($i = 90^\circ$); onda S propagantesi verticalmente



La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali

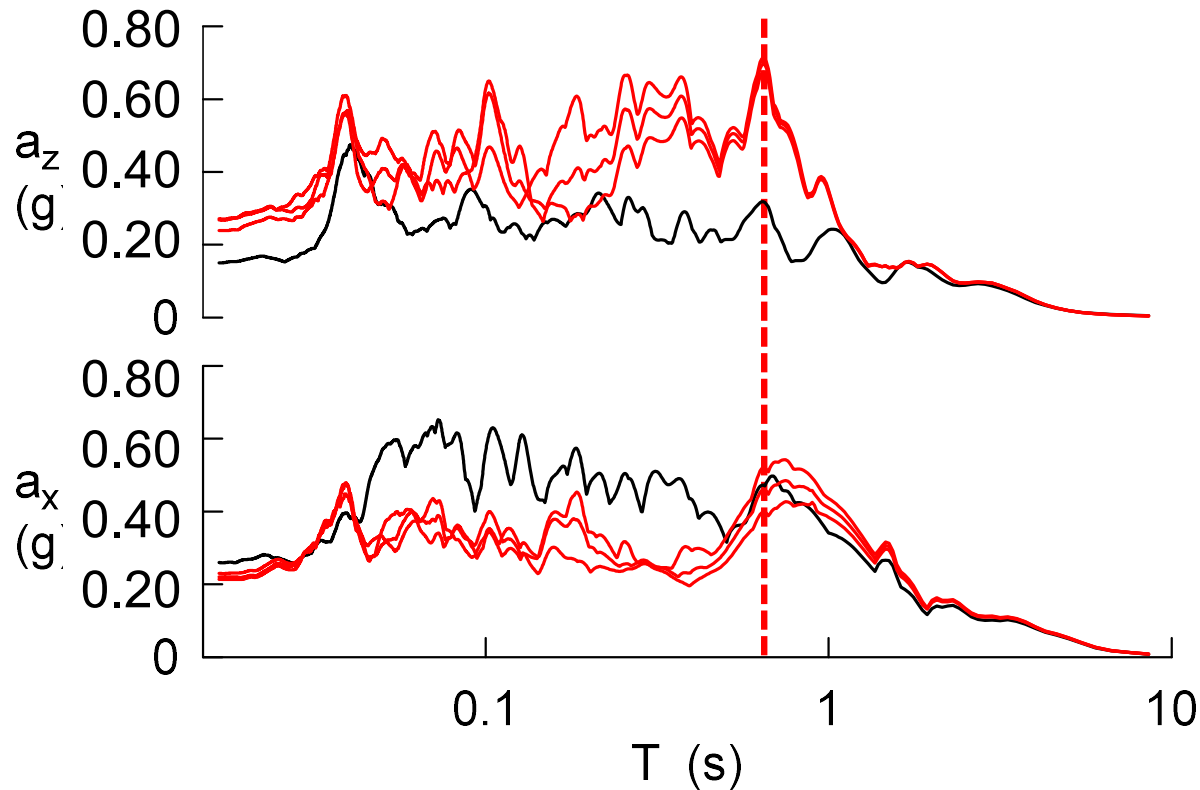
Analisi numeriche visco-elastiche di un versante a gradone ($i = 90^\circ$); onda P propagantesi verticalmente



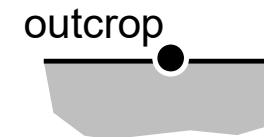
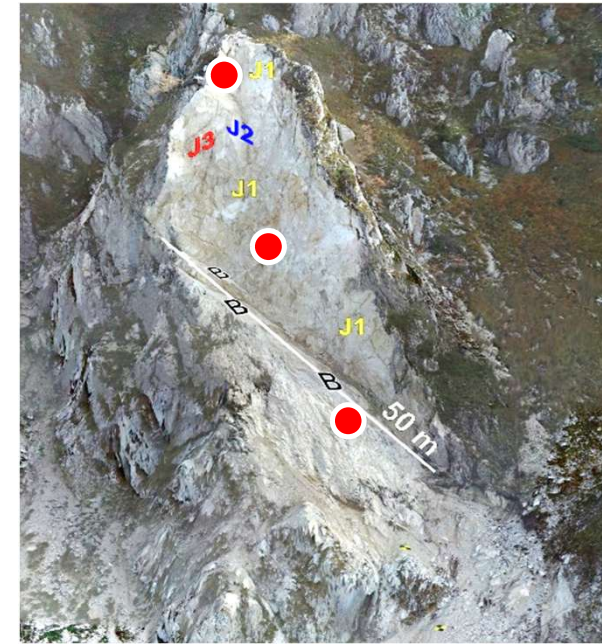
La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali

Analisi numeriche visco-elastiche di un versante a gradone ($i = 90^\circ$)

Risultati (spettri di risposta)

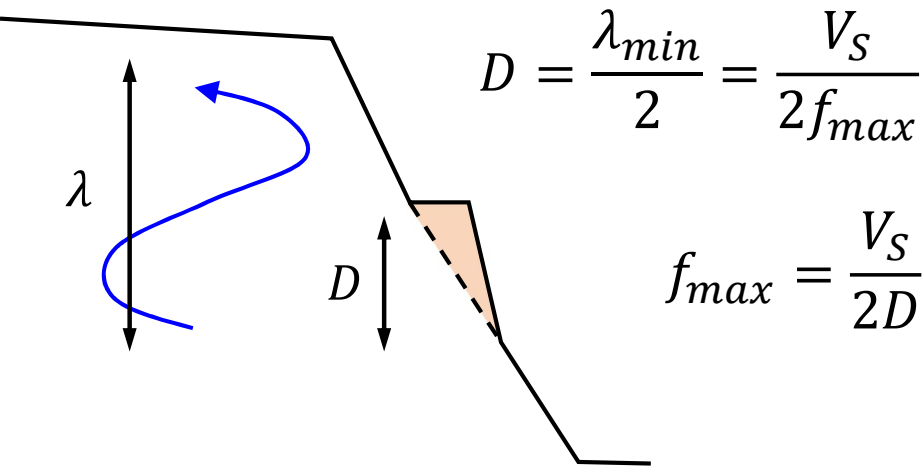


Piè la Rocca
 $V_s = 2200$ m/s, $H = 300$ m, $h = 210$ m

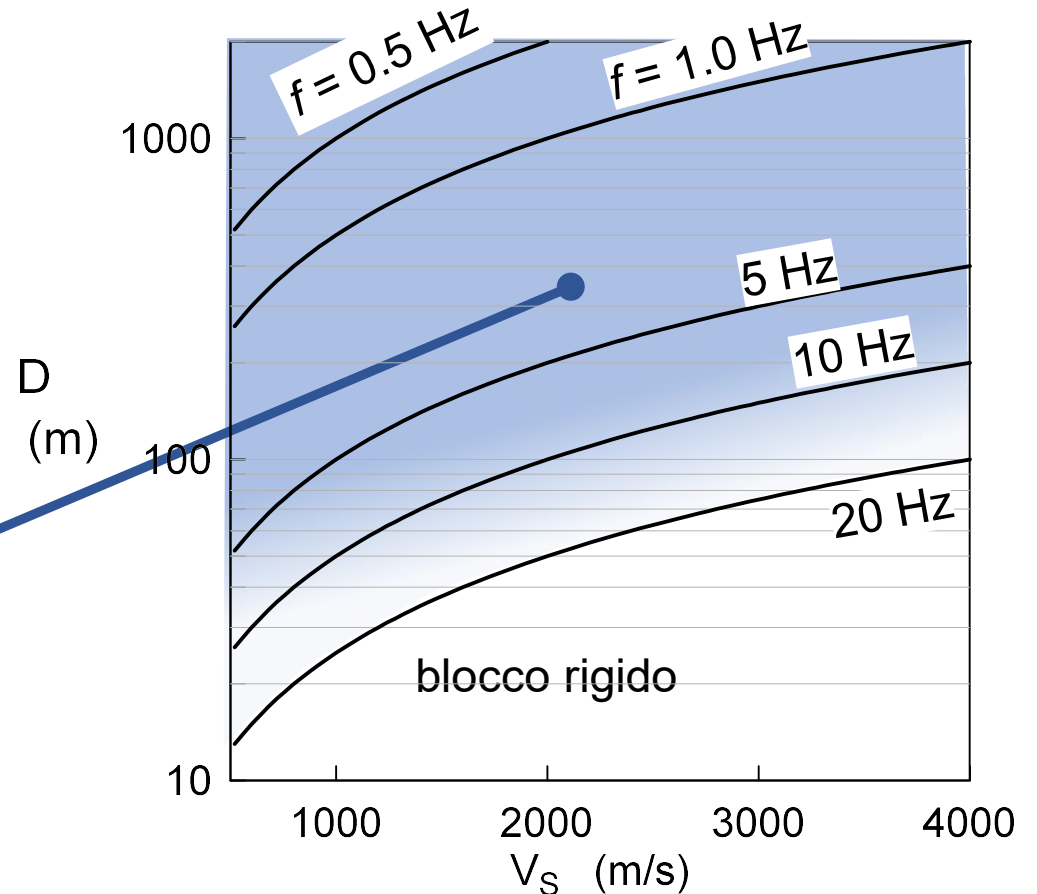


La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali

Dimensioni massime per mantenere un moto sincrono



determinazione di un'accelerazione equivalente,
(AGI, 2005)



1. Le frane in roccia provocate da eventi sismici
2. Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici
3. La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali
- 4. Le azioni inerziali su blocchi rigidi**
5. Le verifiche con forza pseudostatica

Le azioni inerziali su versanti rocciosi

- se non si raggiunge la resistenza il blocco non ha moto relativo rispetto al substrato $\mathbf{a}(t) = \mathbf{a}_b(t)$

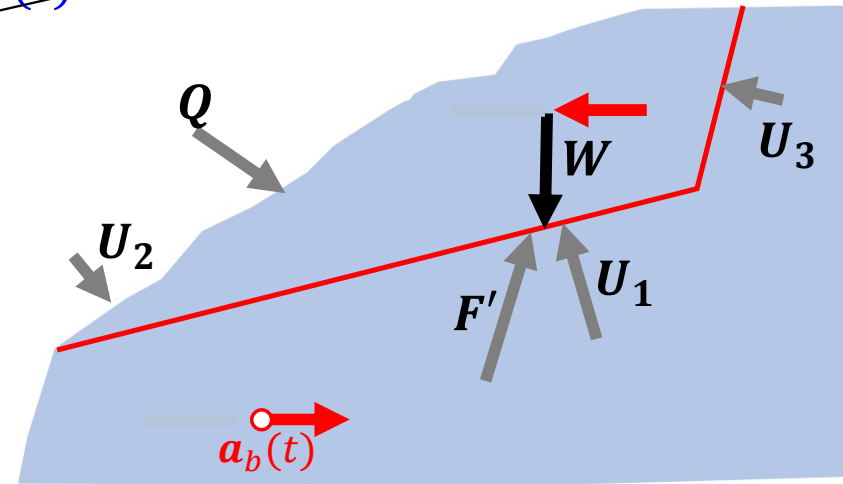
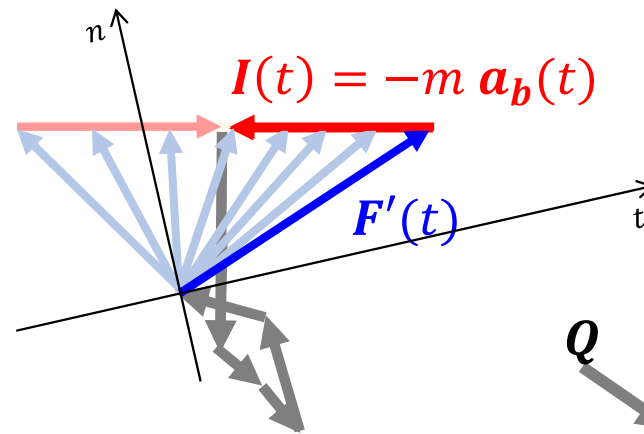
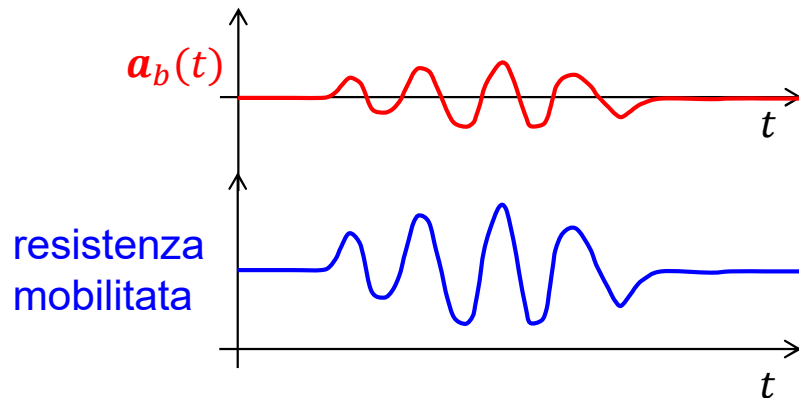
- Dall'equilibrio dinamico istantaneo si ricava una forza di contatto $\mathbf{F}'$ variabile nel tempo

$$\mathbf{W} + \mathbf{I}(t) + \mathbf{Q} + \mathbf{U} + \mathbf{F}'(t) = 0$$

$$\mathbf{S} + \mathbf{I}(t) + \mathbf{F}'(t) = 0$$

... e risolvendo nella direzione tangenziale:

$$T_m(t) = -(S_t + I_t(t))$$



Le azioni inerziali su versanti rocciosi

- se non si raggiunge la resistenza il blocco non ha moto relativo rispetto al substrato $\mathbf{a}(t) = \mathbf{a}_b(t)$

- Dall'equilibrio dinamico istantaneo si ricava una forza di contatto $\mathbf{F}'$ variabile nel tempo

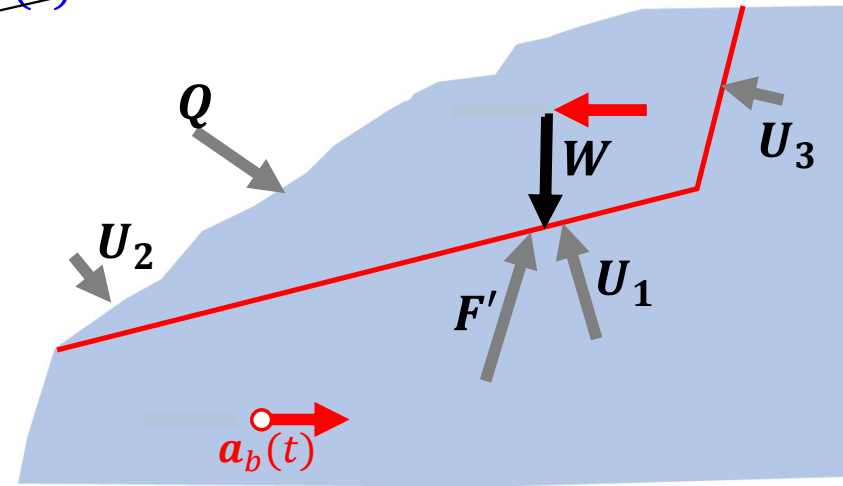
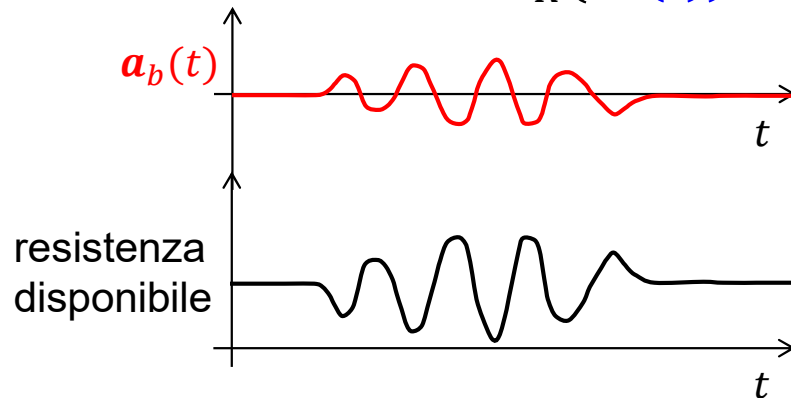
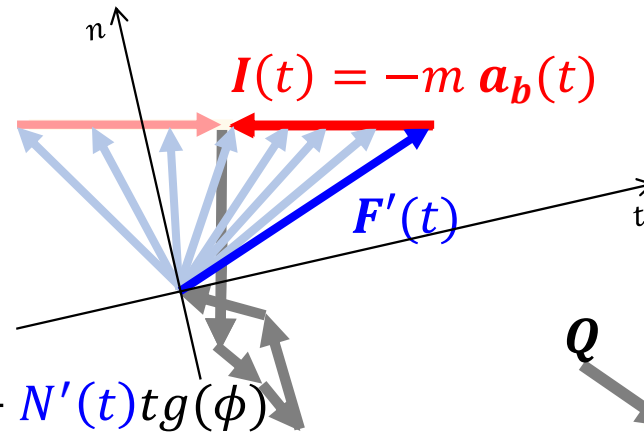
$$\mathbf{W} + \mathbf{I}(t) + \mathbf{Q} + \mathbf{U} + \mathbf{F}'(t) = 0$$

$$\mathbf{S} + \mathbf{I}(t) + \mathbf{F}'(t) = 0$$

- in direzione normale:

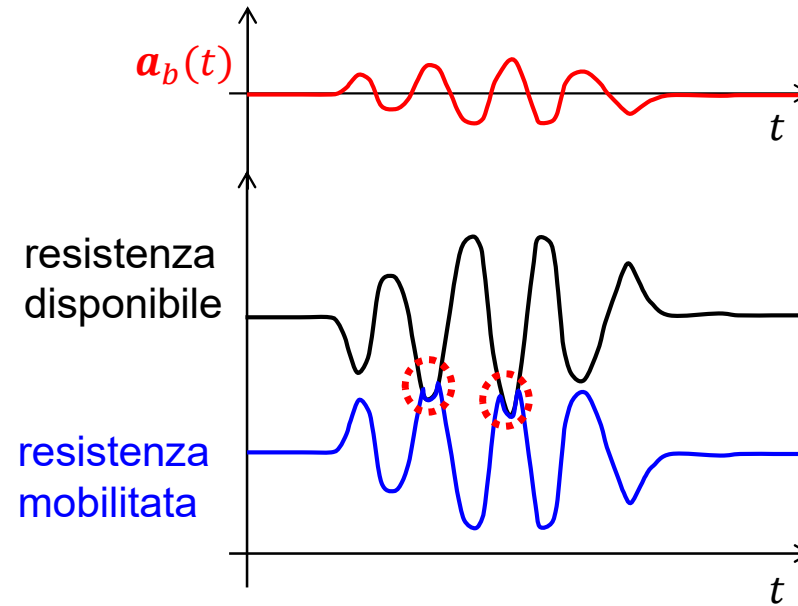
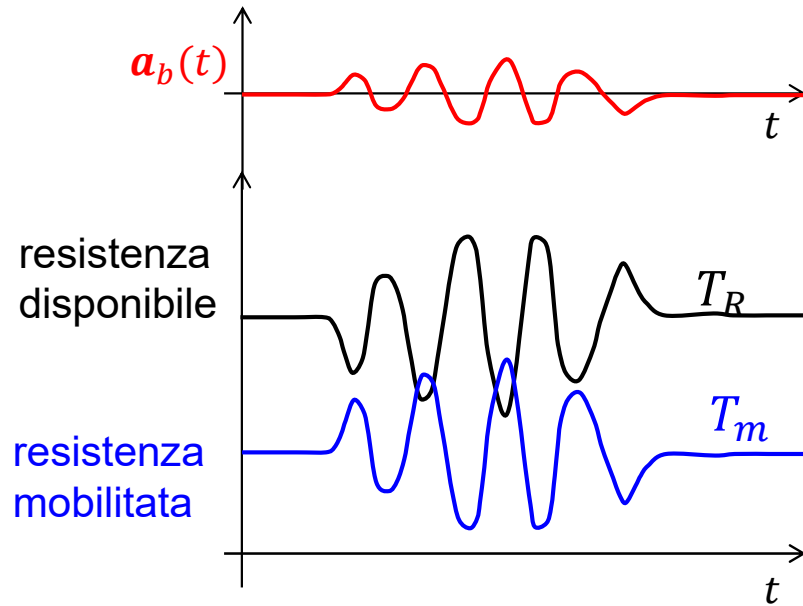
$$N'(t) = -(S_n + I_n(t))$$

- la resistenza disponibile: $T_R(N'(t)) = c'A + N'(t)tg(\phi)$



Le azioni inerziali su versanti rocciosi

- Il fattore di sicurezza è quindi variabile nel tempo e temporaneamente può risultare $= 1$



accumulo di spostamenti irreversibili negli intervalli con $F_S=1$

Le azioni inerziali su versanti rocciosi

Newmark N.M. (1965). Effect of earthquakes on dams and embankments. Géotechnique, 15(2): 139-160

- La condizione descritta ha dei limiti intrinseci determinati dalla resistenza disponibile T_R

$$|T_m(t)| \leq T_R(t) = f_R (N'(t)) = N'(t) \tan \phi$$

- La condizione limite si trova imponendo che $|T_m(t)| = T_R(t)$ (graficamente il limite viene raggiunto quando la forza di inerzia $I(t)$ tocca il cono):

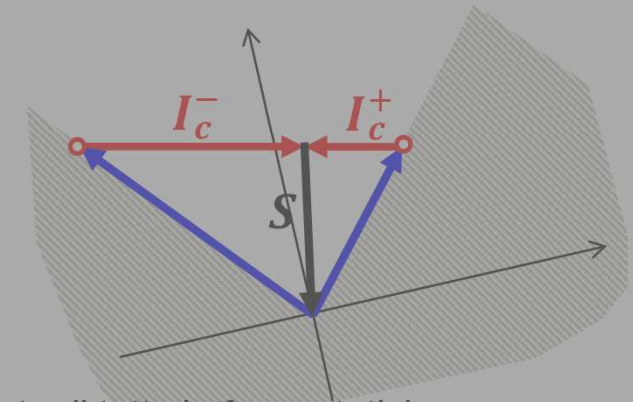
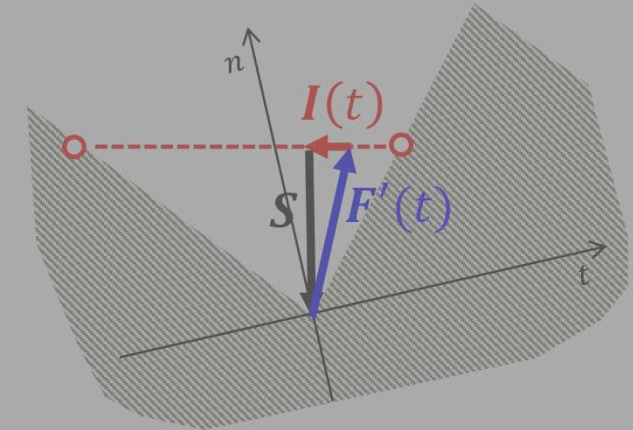
Ciò avviene per i valori di **accelerazione critica**:

$$a_c^+ = \frac{1}{m \cos \psi + \sin \psi \tan \phi} \frac{-S_t + S_n \tan \phi}{m \cos \psi + \sin \psi \tan \phi}$$

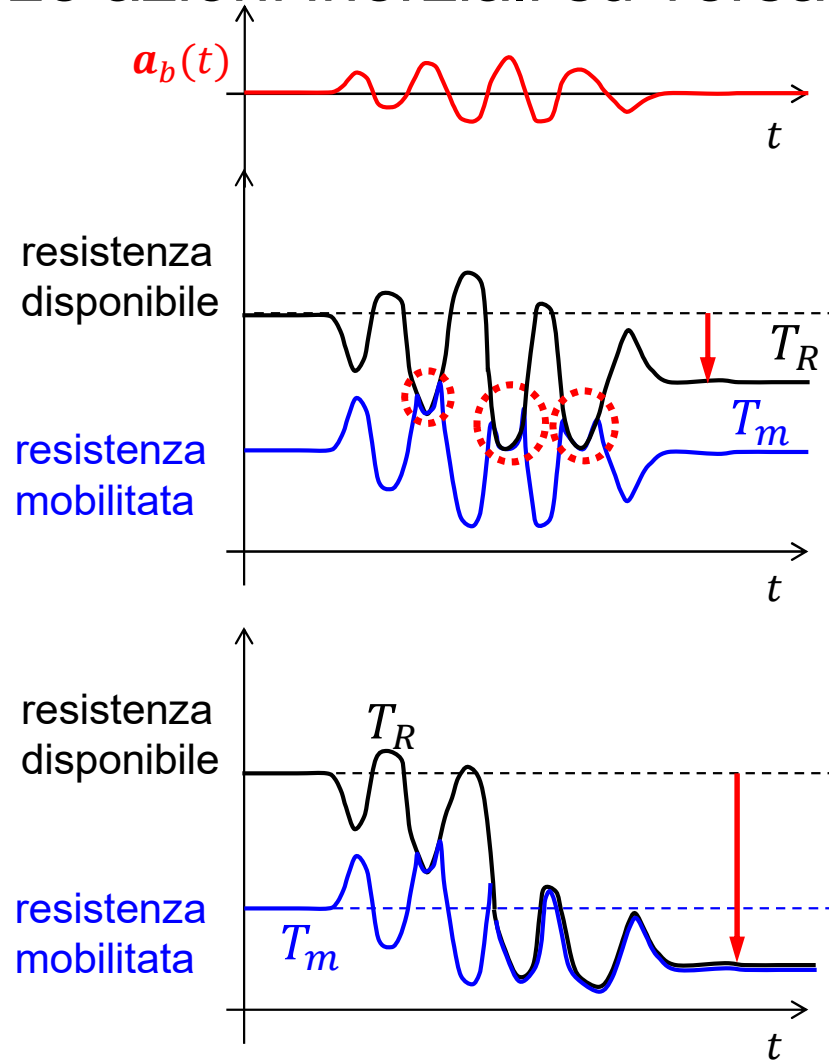
$$a_c^- = \frac{1}{m \cos \psi - \sin \psi \tan \phi} \frac{S_t + S_n \tan \phi}{m \cos \psi - \sin \psi \tan \phi}$$

$$a_c^+ = g \tan(\phi - \psi) \quad \text{per } S \equiv W$$

m è la massa del blocco, S_t e S_n sono le componenti tangenziale e normale della risultante di tutte le forze statiche



Le azioni inerziali su versanti rocciosi



- Gli scorrimenti irreversibili possono determinare un decadimento dei parametri di resistenza

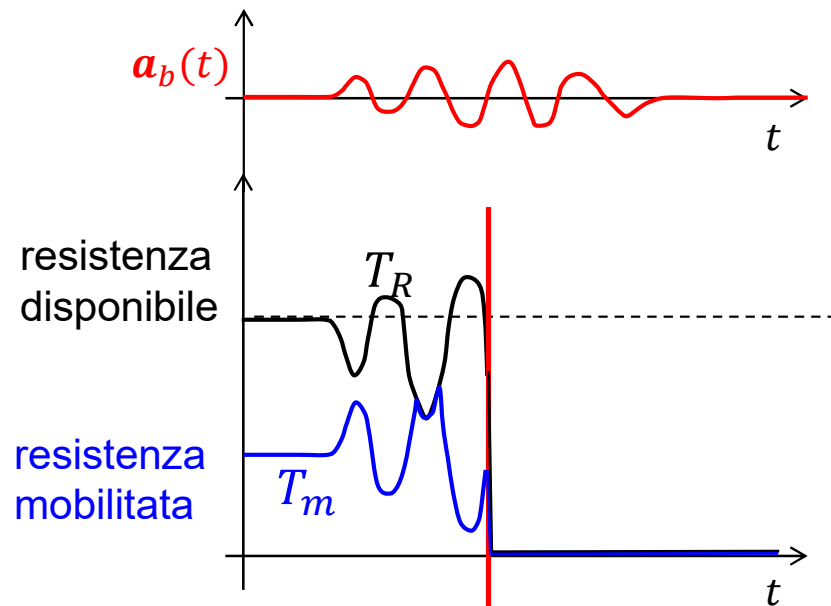
maggiore accumulo di spostamenti negli intervalli con $F_s=1$

- se la caduta di resistenza è tale da andare al di sotto del valore STATICO della resistenza mobilitata

COLLASSO

(Rampello e Callisto, 2008)

Le azioni inerziali su versanti rocciosi



- Per blocchi rocciosi su versanti acclivi, ben prima che i parametri di resistenza decadano in maniera significativa, si possono raggiungere spostamenti che innescano un collasso dovuto al cambiamento delle condizioni di vincolo e alla perdita completa della configurazione di equilibrio (ad es. ribaltamento, rottura della base di appoggio)

COLLASSO



Le azioni inerziali su versanti rocciosi

- in generale il blocco è disposto in una configurazione di cuneo:
non si conosce il possibile meccanismo di scorrimento
- è necessario considerare la direzione della risultante R delle forze esterne applicate al blocco (escluse le reazioni vincolari): $R = S + I$

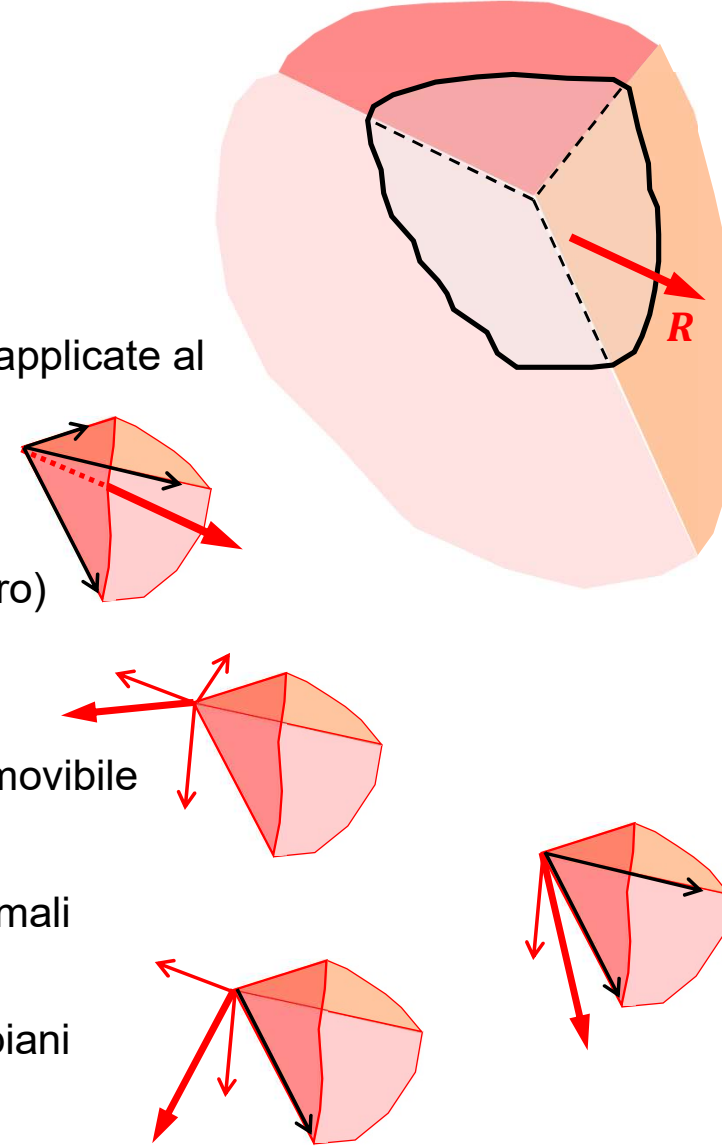
Se la direzione di R è compresa:

➤ ... all'interno del triedro dei piani di contatto → distacco completo (volo libero)

➤ ... all'interno del triedro dei piani normali ai piani di contatto → blocco inamovibile

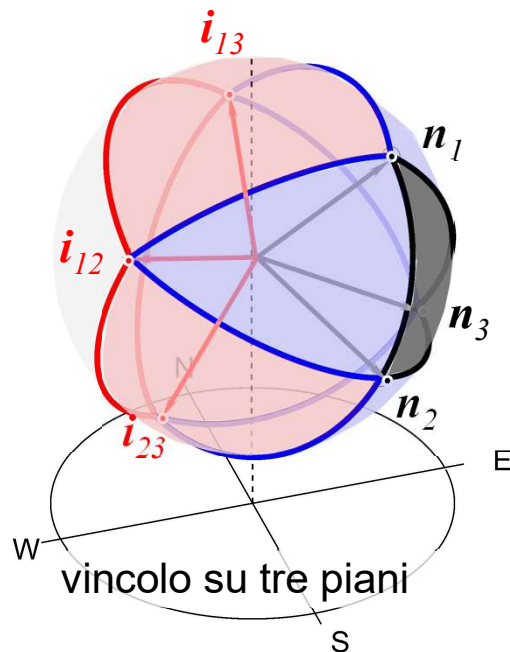
➤ ... all'interno del triedro formato da un piano di contatto e da due piani normali
→ scivolamento lungo un piano

➤ ... all'interno del triedro formato da un piano normale ai contatti e da due piani di contatto
→ scivolamento lungo la retta di intersezione tra due piano

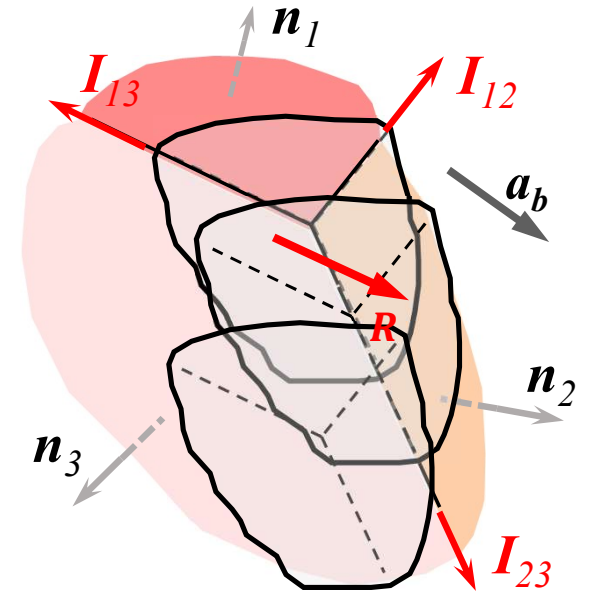
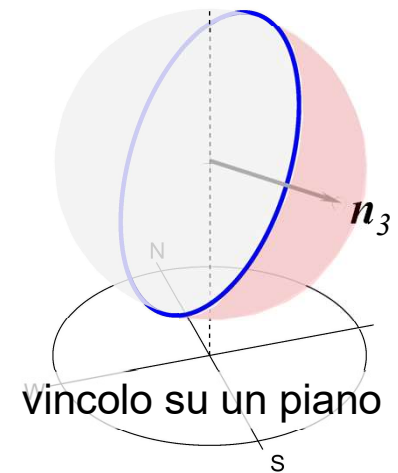
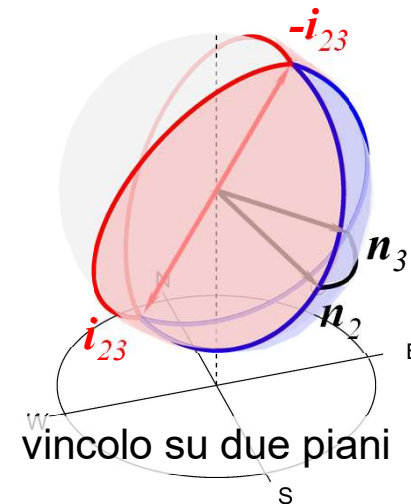


Le azioni inerziali su versanti rocciosi

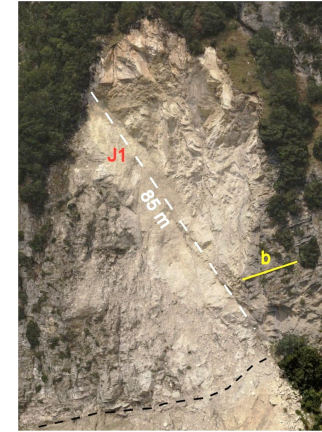
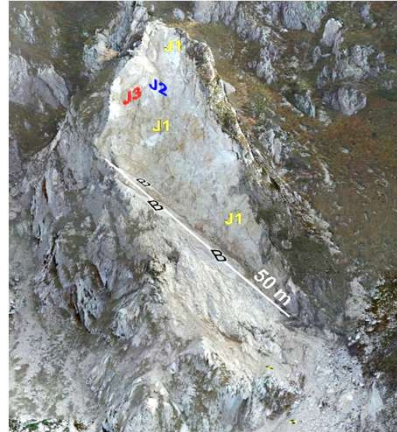
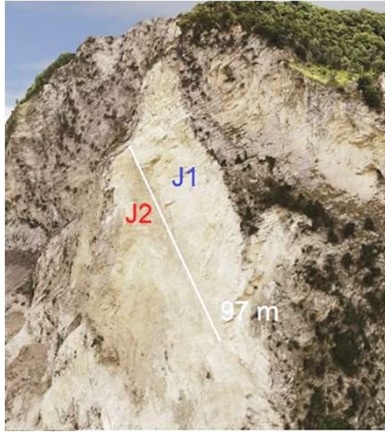
- versori normali ai piani $\mathbf{n}_i$ (uscenti dal blocco)
- versori delle rette di intersezione $\mathbf{i}_{ij}$ (uscenti dall'ammasso)
- appartenenza di $\mathbf{R}$ ad uno dei triedri (sistema di disuguaglianze)



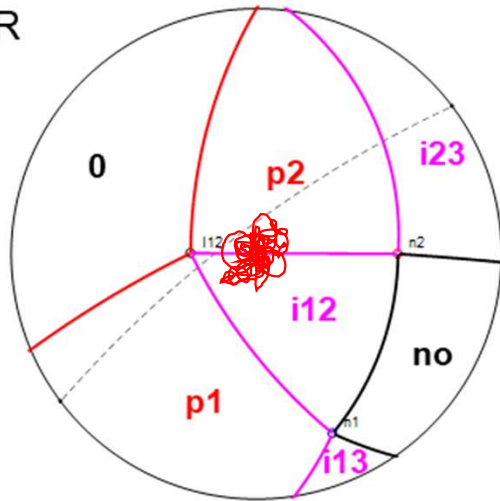
- distacco
- scivolam. su un piano
- scivolam lungo $\mathbf{i}_{ij}$
- no moto relativo



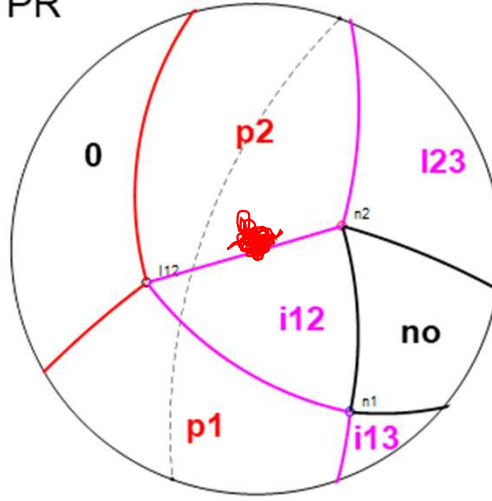
Le azioni inerziali su versanti rocciosi



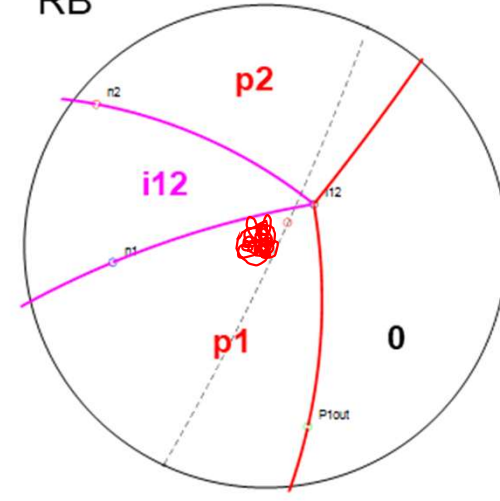
NR



PR



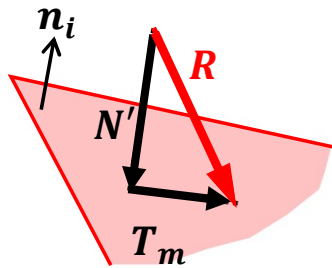
RB



Le verifiche con forza inerziale istantanea (non pseudostatica)

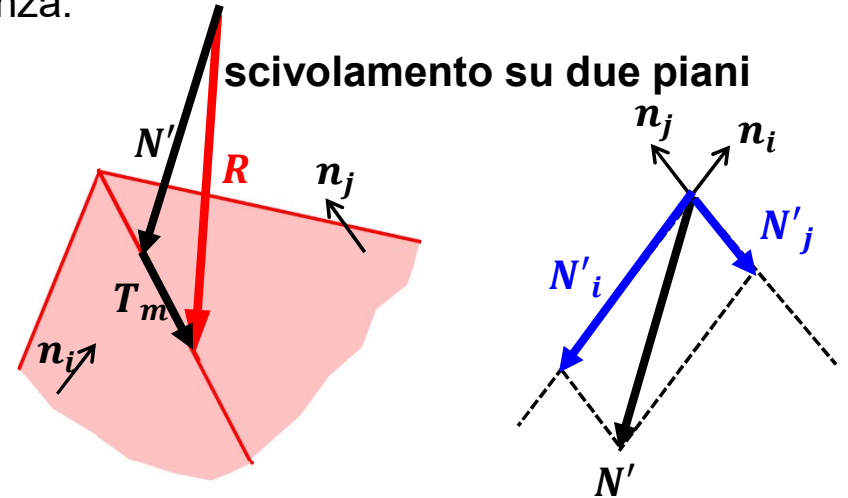
- Una volta individuato il meccanismo è possibile definirne la resistenza:

scivolamento su un piano



$$T_R = cA_i + N' \operatorname{tg}(\phi)$$

scivolamento su due piani



$$T_R = c_i A_i + N'_i \operatorname{tg}(\phi) + c_j A_j + N'_j \operatorname{tg}(\phi)$$

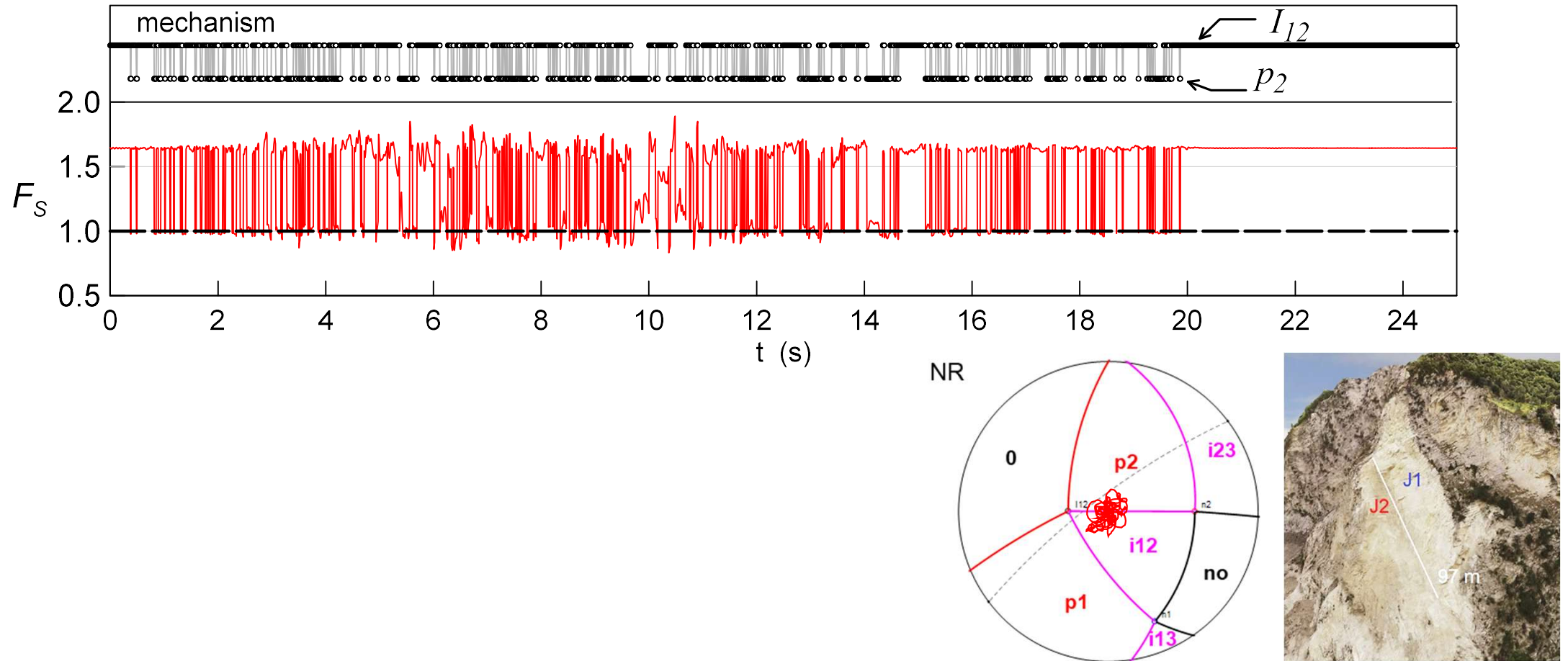
- Il cambio di meccanismo può comportare una discontinuità nel valore istantaneo della resistenza:

$$F_S = \frac{T_R}{T_m} = \frac{cA_i + N' \operatorname{tg}(\phi)}{T_m}$$

$$F_S = \frac{T_R}{T_m} = \frac{c_i A_i + N'_i \operatorname{tg}(\phi) + c_j A_j + N'_j \operatorname{tg}(\phi)}{T_m}$$

Le verifiche con forza inerziale istantanea (non pseudostatica)

- Calcolo del coefficiente di sicurezza istantaneo per un blocco 3D con attivazione di due meccanismi



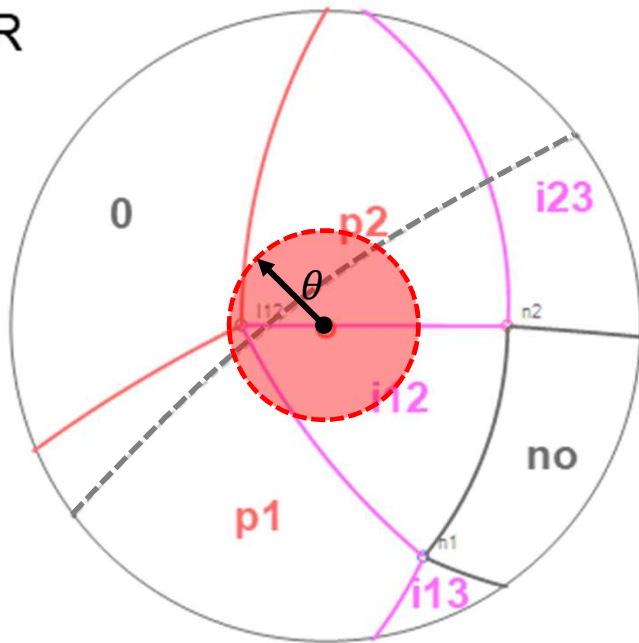
1. Le frane in roccia provocate da eventi sismici
2. Le frane da scivolamento in roccia provocate da eventi sismici
3. La risposta sismica locale di pareti rocciose subverticali
4. Le azioni inerziali su blocchi rigidi
5. **Le verifiche con forza pseudostatica**

Le verifiche con forza pseudostatica

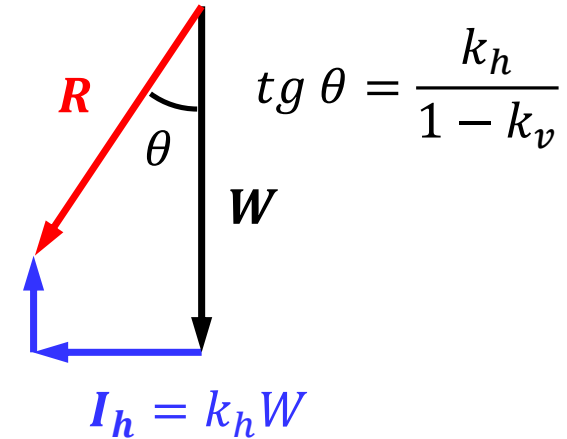
«...L'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile...» NTC18

- Qual è la direzione più svantaggiosa per l'applicazione 3D della forza pseudostatica ?

NR



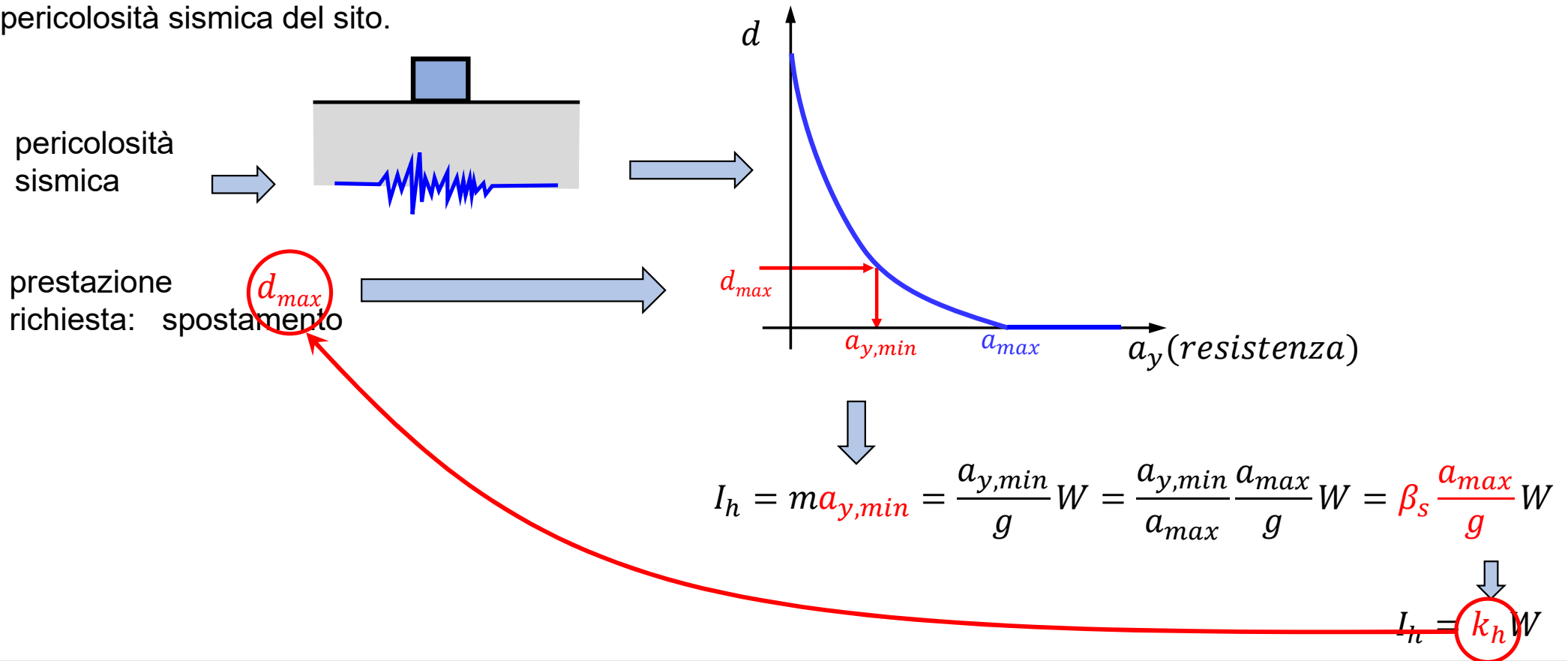
$$I_v = +k_v W$$



- Ricerca dei meccanismi possibili attivati da una risultante compresa nel cono con asse verticale ed apertura θ
- La direzione che attiva il meccanismo con minor grado di sicurezza potrebbe non coincidere con le direzioni più usuali per l'applicazione della forza pseudostatica (normale al versante, immersione della $I/2$)

Le verifiche con forza pseudostatica

- Qual è l'intensità che rende equivalenti terremoto e forza pseudostatica?
- La forza pseudostatica è la forza inerziale corrispondente ad una accelerazione critica (resistenza rispetto allo scivolamento) che, in metodi di analisi più avanzati, garantisce una **certa prestazione** del pendio, data la pericolosità sismica del sito.

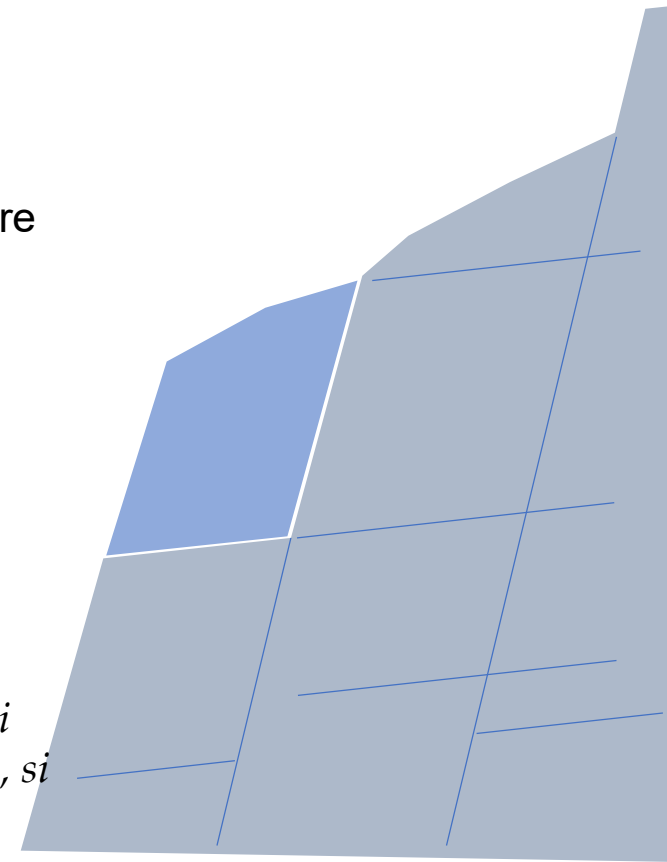


Le verifiche con forza pseudostatica

«...(NTC 18) L'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso W del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza ...»

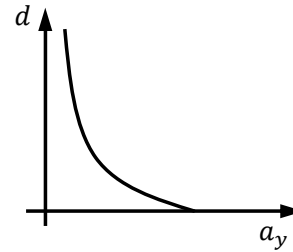
- Quali sono le prestazioni richieste per un blocco a rischio scivolamento ?
- Spostamento massimo che non induce la perdita della configurazione vincolare
- Fattori da tenere in considerazione:
 - volume del blocco
 - geometria dei contatti
 - resistenza dei piani di contatto
 - fragilità della resistenza allo scorrimento
 - spostamenti già sviluppati

«...(Circolare 7 CSLLPP) nel caso di pendii in roccia, soprattutto per i meccanismi di rottura per crollo e per ribaltamento, decisamente più fragili di quello per scorrimento, si dovrebbero utilizzare valori β_s più elevati, al limite unitari.»



Le verifiche con forza pseudostatica

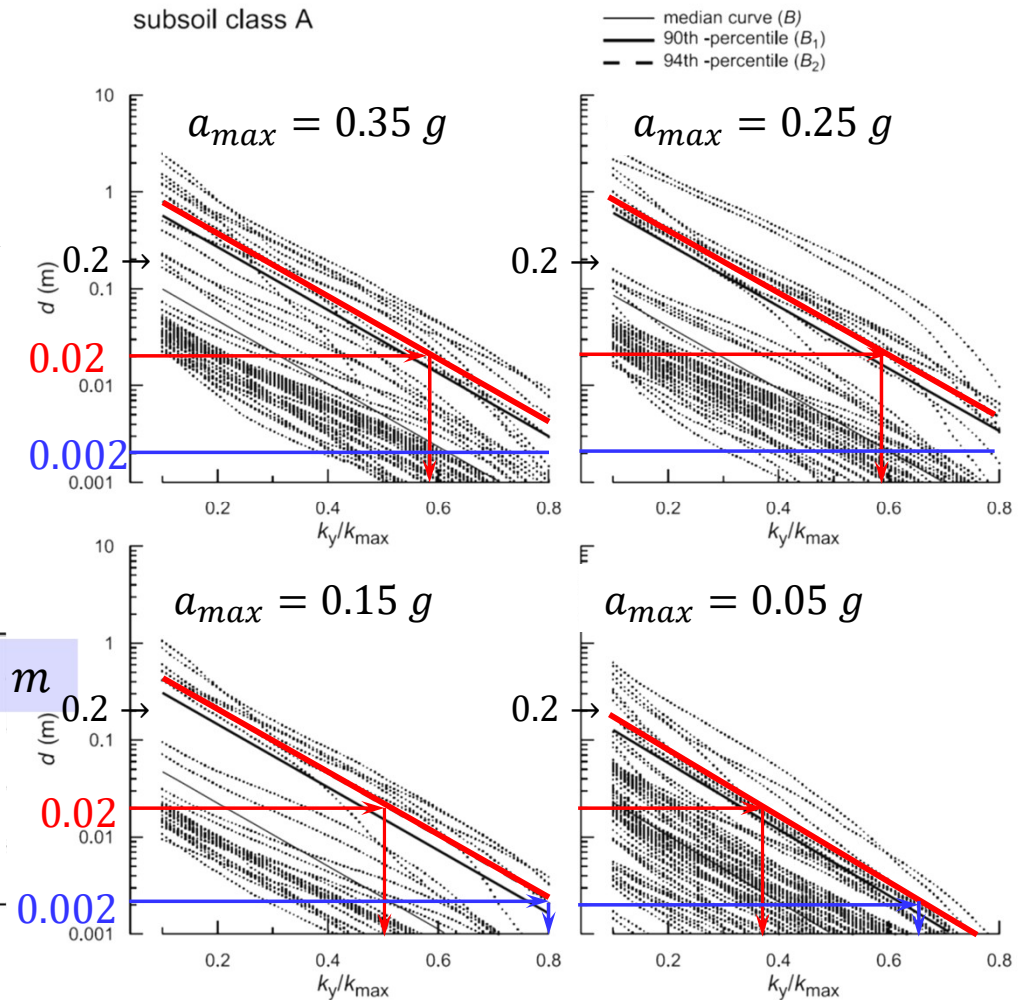
- NTC 2018: $d_{max} = 0.15 - 0.20$ m



- Valori del fattore di coefficiente sismico orizzontale plausibili per scivolamenti in roccia $d_{max} < 0.02$ m

Tab. 7.11.I – Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito

	Categoria di		d_{max}	
	A		0.02 m	0.002 m
	β_s			
$0,2 < a_g (g) \leq 0,4$	0,30		0.60	0.90
$0,1 < a_g (g) \leq 0,2$	0,27		0.50	0.80
$a_g (g) \leq 0,1$	0,20		0.37	0.66



(Rampello et al., 2010)

Richiamo dei punti più rilevanti

Casi di frane in roccia indotte da terremoti

- importanza dell'analisi strutturale dell'ammasso
- assetti strutturali preferenziali
- limiti delle ipotesi di movimento rigido

Risposta sismica di pareti rocciose

- amplificazioni orizzontali in cresta
- importanza della componente verticale

Verifiche con forze pseudostatiche

- ricerca di tutti i possibili meccanismi
- coefficienti sismici elevati

Ringraziamenti

... a chi ha avviato e condotto le ricerche sulle frane in roccia del terremoto del 2016,
... a chi studia i meccanismi di instabilità di versanti rocciosi in condizioni statiche e dinamiche:

Paolo Tommasi	IGAG – Consiglio Nazionale delle Ricerche
Anita Di Giulio	
Valentina Tuccio	
Tatiana Rotonda	DISG – Sapienza Università di Roma
Giuseppe Lanzo	
Giovanni Forte	DICEA – Università di Napoli Federico II
Antonio Santo	
Melania De Falco	

Riferimenti bibliografici

- Hungr O., Leroueil S., Picarelli L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* 11:167–194 DOI 10.1007/s10346-013-0436-y
- Keefer D. K., 1984. Landslides caused by earthquakes. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 95, 406-421
- Rodriguez C., Bommer J., Chandler R., 1999. Earthquake-induced landslides: 1980–1997. *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, 18, 325-346
- Chen T.C., Lin M.L., Hung J.J., 2003. Pseudostatic analysis of Tsao-Ling rockslide caused by Chi-Chi earthquake. *Engineering Geology* 71: 31–47.
- Huang R., Pei X., Fan X., Zhang W, Li S., Li B., 2012. The characteristics and failure mechanism of the largest landslide triggered by the Wenchuan earthquake, May 12, 2008, China. *Landslides* (2012) 9:131–142, DOI 10.1007/s10346-011-0276-6
- Evans S.G., Scarascia Mugnozza G., Strom A., Hermanns R.L. (Eds.) 2002. Landslides from massive rock slope failure and associated phenomena. In *Landslides from Massive Rock Slope Failure*. Springer, Dordrecht. ISBN-10 1-4020-4035-0.
- Plafker G., Ericksen G., E., (1978) Nevados Huascaran Avalanches, Peru. In B. Voight (Ed.), *Rockslides and Avalanches*, 1, *Natural Phenomena — Developments in Geotechnical Engineering A* (1978), Elsevier, pp. 277-314

Riferimenti bibliografici

- Moore J.R., Gischig V., Amann F., Hunziker M. (2012). Earthquake-triggered rock slope failures: Damage and site effects. *Proc. 11th Int. & 2nd North Am. Symp. on Landslides*.
- GEER (2016). Engineering reconnaissance following the 2016 M6.0 Central Italy earthquake. Report n.o GEER-050A. Geer Team Leaders: Eds. J.P. Stewart and G. Lanzo. doi:10.18118/G65K5W
- GEER (2017). Engineering reconnaissance following the October 2016 Central Italy earthquake. Report n.o GEER-050D. Geer Team Leaders: Eds. P. Zimmaro and J.P. Stewart. doi:10.18118/G6HS39
- Tommasi P., Di Giulio A., Santo A., Forte G., De Falco M., Verrucci L., Lanzo G., Rotonda T., Franke K.W. (2019). Effects of the Central Italy 2016 seismic sequence on slope stability: preliminary analysis of some major rock slides. In Silvestri & Moraci (eds.) *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Costructions*
- Verrucci L., Forte G., De Falco M., Tommasi P., Lanzo G., Franke K. W. and Santo A., (2023). Instantaneous limit equilibrium back analyses of major rockslides triggered during the 2016–2017 central Italy seismic sequence. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 23, 1177–1190, <https://doi.org/10.5194/nhess-23-1177-2023>.
- Forte G., Verrucci L., Di Giulio A., De Falco M., Tommasi P., Lanzo G., Franke K.W., Santo A., (2021), Analysis of major rock slides that occurred during the 2016–2017 Central Italy seismic sequence. *Engineering Geology*, 290, 106194, ISSN 0013-7952, <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106194>. Ashford S.A., Sitar N., Lysmer J., Deng N., 1997. Topographic effects on the seismic response of steep slopes. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 87: 701–9.

Riferimenti bibliografici

- Bouckovalas G.D., Papadimitriou A.G., 2005. Numerical evaluation of slope topography effects on seismic ground motion. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* , 25 (7): 547–58
- Rizzitano E., Cascone E., Biondi G., 2014. Coupling of topographic and stratigraphic effects on seismic response of slopes through 2D linear and equivalent linear analyses. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 67:66–84.
- AGI, Associazione Geotecnica Italiana, 2005. Linee Guida sugli Aspetti geotecnici della progettazione in zona sismica, Pàtron Editore.
- Jeong S., Asimaki D., Dafni J., Wartman J., 2019. How topography-dependent are topographic effects? Complementary numerical modeling of centrifuge experiments. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 116: 654-667.
- Jeong S., 2013. Topographic amplification of seismic motion including nonlinear response. PhD Thesis. Georgia Institute of Technology
- Yang, G., Qi, S., Wu, F., et al., 2018. Seismic amplification of the anti-dip rock slope and deformation characteristics: a large-scale shaking table test. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 115: 907–916.
- Ribacchi R., Rotonda T., Graziani A., Boldini D., Tommasi P., Lembo Fazio A., 2018. Meccanica delle Rocce. Ed. Efestò

Riferimenti bibliografici

- Rampello S., Callisto L., 2008. Stabilità dei Pendii in condizioni sismiche. In Opere Geotecniche in condizioni sismiche. *XII Ciclo di Conferenze di Meccanica e Ingegneria delle Rocce*, 241-271.
- Rampello S., Callisto L., Fargnoli P., 2010. Evaluation of slope performance under earthquake loading conditions. *Rivista Italiana di Geotecnica*, Patron editore, Bologna, 44 (4): 29-41. ISSN 0557-1405
- Verrucci L., Lanzo G., Rotonda T., Tommasi P., Di Giulio A., 2018. Valutazione del comportamento sismico 3D di blocchi di roccia mediante il metodo degli spostamenti. *Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica IARG* 2018. Genova, 4-6 Luglio 2018.
- Lusini E., Verrucci L., Boldini D. (2023). Computation of irreversible seismic displacements of rock wedges: an application to dam abutment safety assessment. *Computers and Geotechnics* 159, 105401, <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105401>.
- Fu, X., Q. Sheng, H. Tang, J. Chen, Y. X. Du, Z. Zhang, and H. Mei. 2019. Seismic stability analysis of a rock block using the block theory and Newmark method. *Int. J. Numer. Anal. Methods Geomech.* 43 (7): 1392–1409. <https://doi.org/10.1002/nag.2903>