



FRANE INDOTTE DA PRECIPITAZIONI: PREVISIONE E PREVENZIONE

Seminario organizzato nell'ambito del Corso Integrato di
Protezione Idraulica del Territorio e Sistemazioni Idrauliche

**Analisi idromeccanica dei fenomeni
di instabilità delle coltri superficiali**

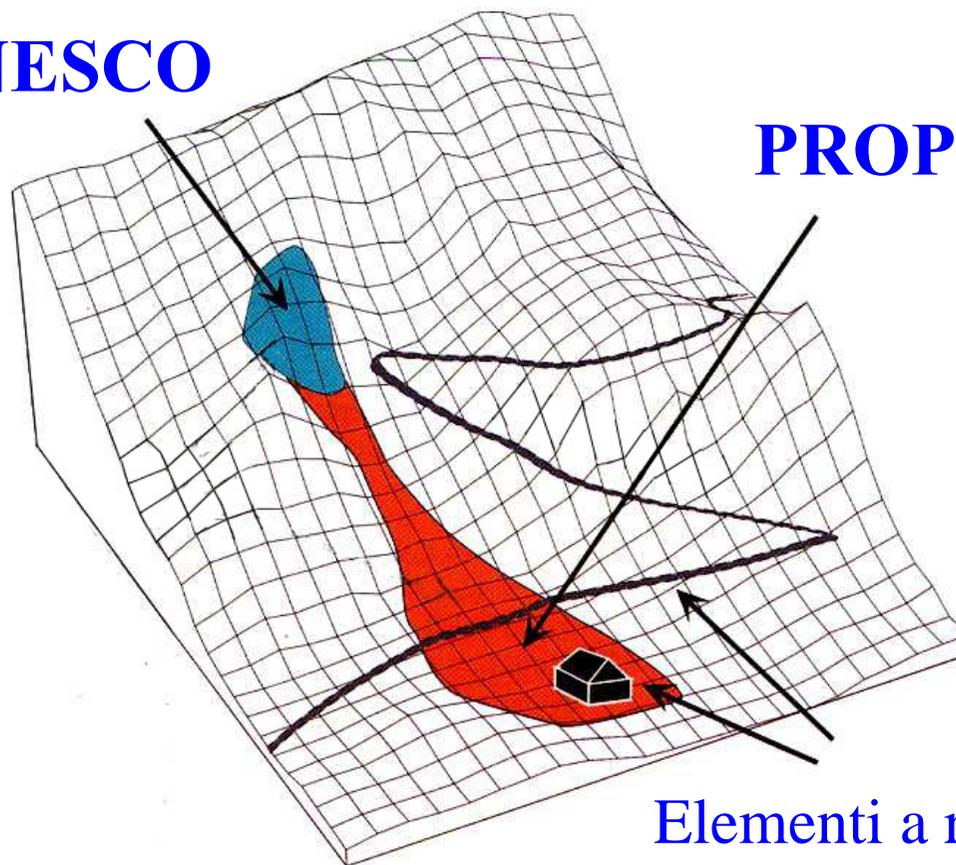
Prof. Claudio Scavia

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
POLITECNICO DI TORINO**

Fasi di una frana

INNESCO

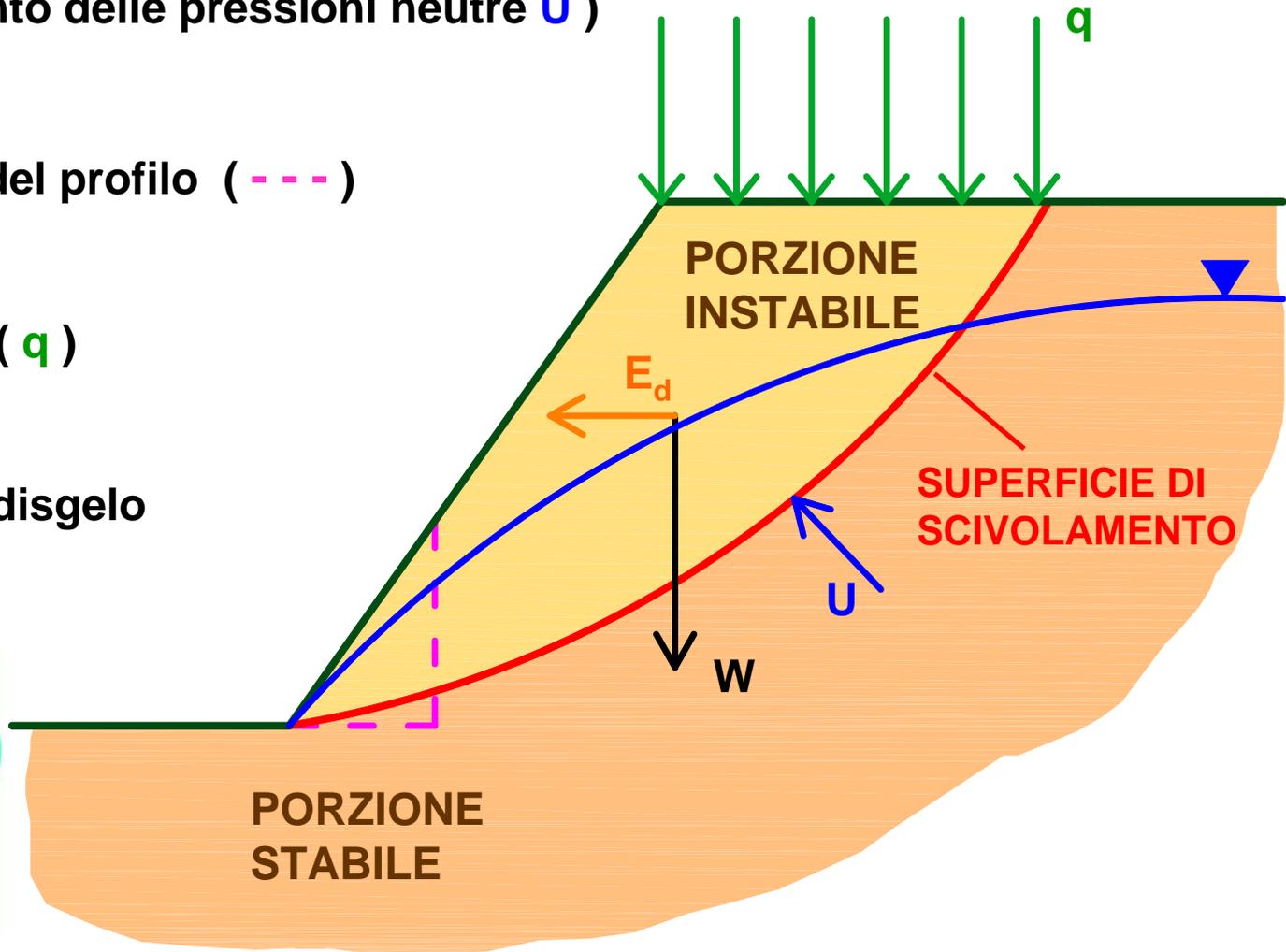
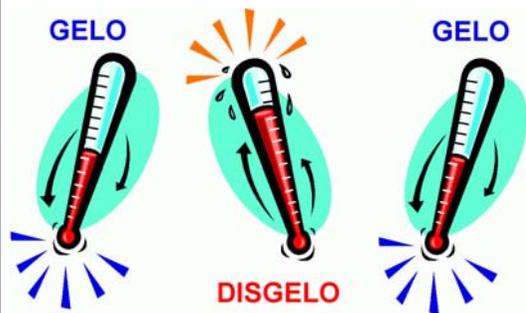
PROPAGAZIONE



Elementi a rischio

Principali cause delle frane

- Terremoti ($E_d = \alpha W$)
- Piogge (aumento delle pressioni neutre U)
- Cambiamenti del profilo (- - -)
- Sovraccarichi (q)
- Cicli di gelo – disgelo



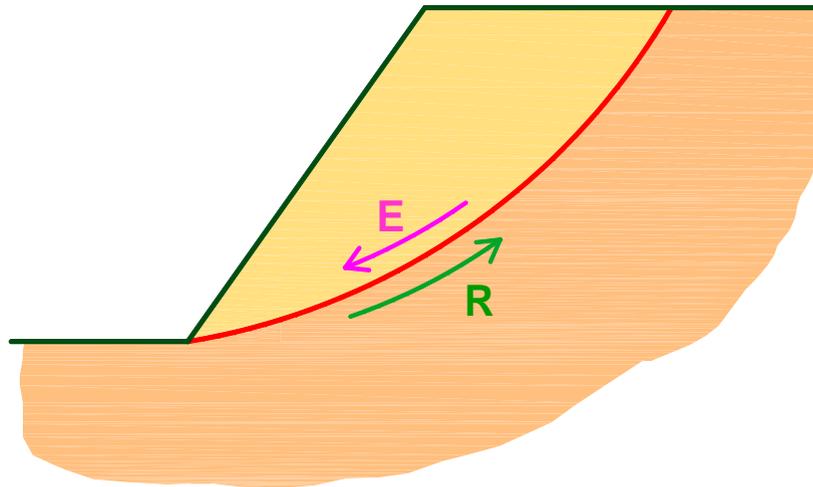
Influenza delle piogge sulla stabilità dei pendii

STABILITA' ASSICURATA SE:

$$R > E$$

AZIONI
RESISTENTI

AZIONI
SOLLECITANTI



IN PRESENZA D'ACQUA → PRINCIPIO DEGLI SFORZI EFFICACI

LA RESISTENZA DIPENDE DAGLI SFORZI EFFICACI

$$\tau_R = \sigma'_N \tan \varphi' = (\sigma_N - u) \tan \varphi'$$

- TERRENO SECCO: $u = 0$

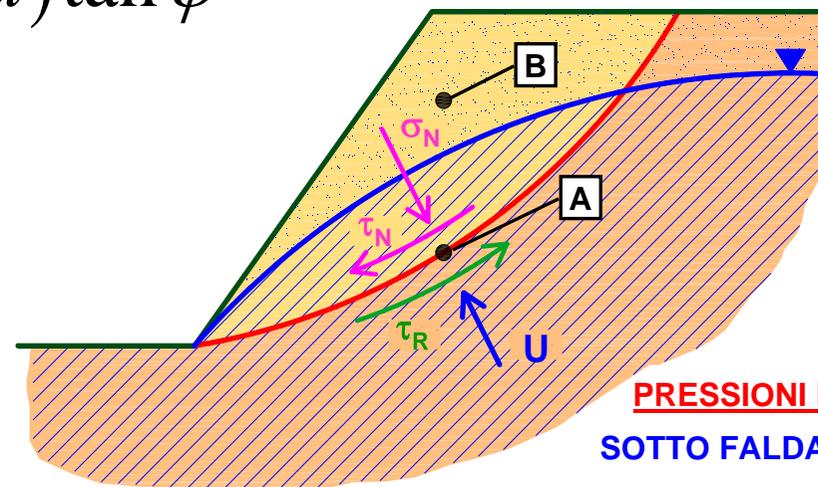
$$\tau_R = \sigma_N \tan \varphi' = \tau_{RS}$$

- TERRENO SATURO: $u_+ > 0$

$$\tau_R = (\sigma_N - u_+) \tan \varphi' < \tau_{RS}$$

- TERRENO NON SATURO: $u_- < 0$

$$\tau_R = (\sigma_N - u_-) \tan \varphi' > \tau_{RS}$$



PRESSIONI NEUTRE
SOTTO FALDA: $U_A > 0$
SOPRA FALDA: $U_B \leq 0$

Esempio di frana indotta da precipitazioni

SARNO (1998)



Influenza delle piogge sulla stabilità dei pendii

SCOPO DELL'ANALISI: valutare la variazione nel tempo del grado di stabilità del pendio.



**MODELLO
IDROGEOLOGICO**

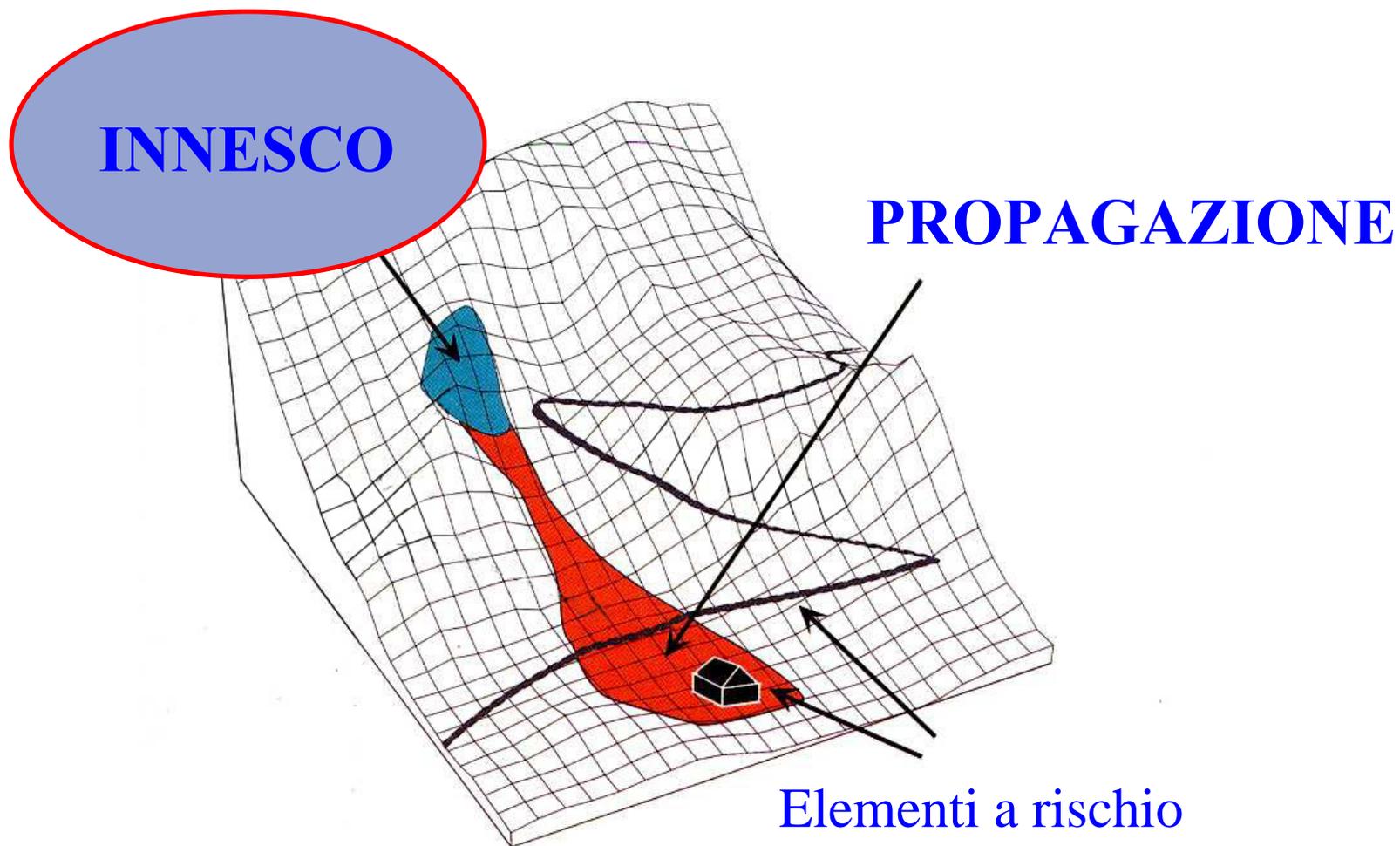


**MODELLO DI FILTRAZIONE DELLA
PIOGGIA E MECCANISMO DI ROTTURA**

A tal fine è necessario conoscere:

- **CARATTERISTICHE DI INTENSITA' E DURATA DELLA PIOGGIA ;**
- **BACINO DI RICARICA IDRAULICA ;**
- **TOPOGRAFIA DEL VERSANTE ;**
- **CARATTERISTICHE FISICO – MECCANICHE DEL TERRENO ;**
- **CARATTERISTICHE FISICO – MECCANICHE DELLE DISCONTINUITA' IN ROCCIA.**

Fasi di una frana



Modellazione idromeccanica dell'innesco

1. Modello del discontinuo

infiltrazione della pioggia lungo le discontinuità naturali

2. Modello del continuo equivalente

Modello del discontinuo

Ammassi rocciosi strutturati

```
graph TD; A[Ammassi rocciosi strutturati] --> B[Scivolamento]; A --> C[Ribaltamento];
```

Scivolamento

- Planare
- Tridimensionale

Ribaltamento

- Bidimensionale
- Tridimensionale

Modello del discontinuo

Esempi di Scivolamenti bi- e tri-dimensionali



La pioggia si infiltra lungo i piani di discontinuità ma difficilmente vengono a crearsi pressioni neutre.

Se esiste un riempimento di materiale argilloso che viene a contatto dell'acqua possono instaurarsi fenomeni di instabilità.

Modello del discontinuo

Esempi di Scivolamenti planari



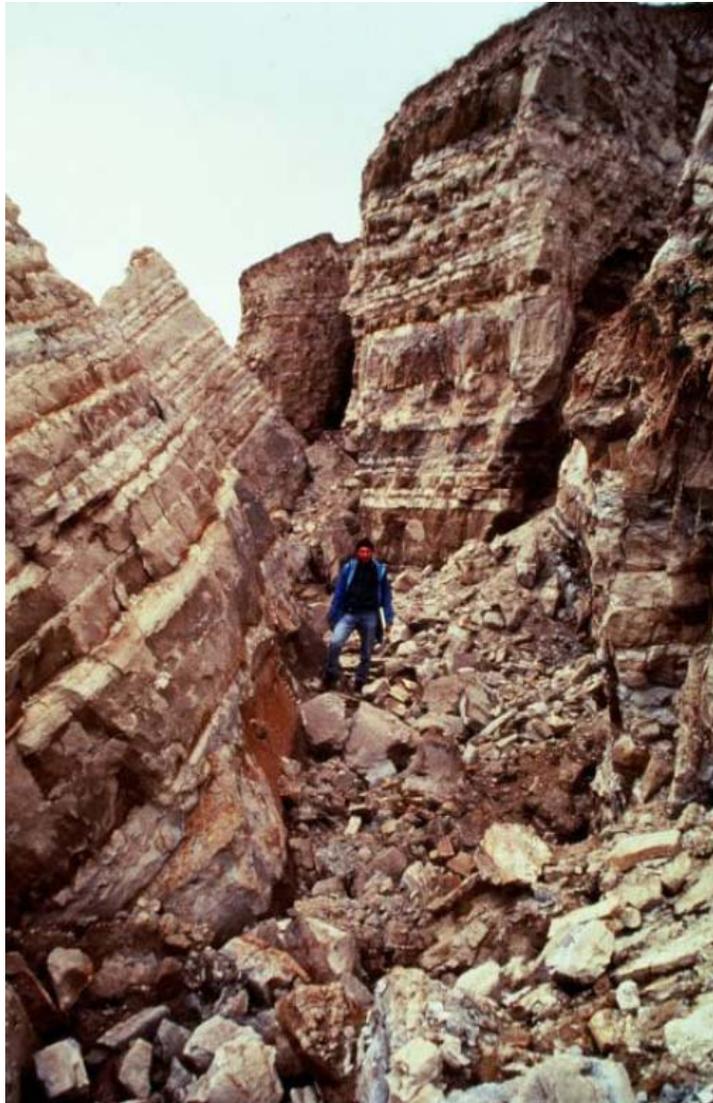
Alternanze di marne e arenarie. Scivolamento su un livello di marna costituito da argille rigonfianti.

La pioggia s'infiltra lungo fratture verticali e provoca il decadimento delle caratteristiche di resistenza del livello rigonfiante.



Modello del discontinuo

Esempi di Scivolamenti planari



Alternanze di marne e arenarie.

Modello del continuo equivalente

**Ammassi di terreno o
ammassi rocciosi non
strutturati**



Scivolamenti profondi

**Coltre superficiale
su substrato**



Scivolamenti superficiali

Modello del continuo equivalente

Esempi di Scivolamenti profondi in terra



La pioggia s'infiltra nel terreno ed incrementa il livello della falda profonda. La relazione tra l'intensità e la durata della pioggia e la stabilità del pendio non è sempre facilmente determinabile.

Modello del continuo equivalente

Esempi di Scivolamenti profondi in ammassi non strutturati



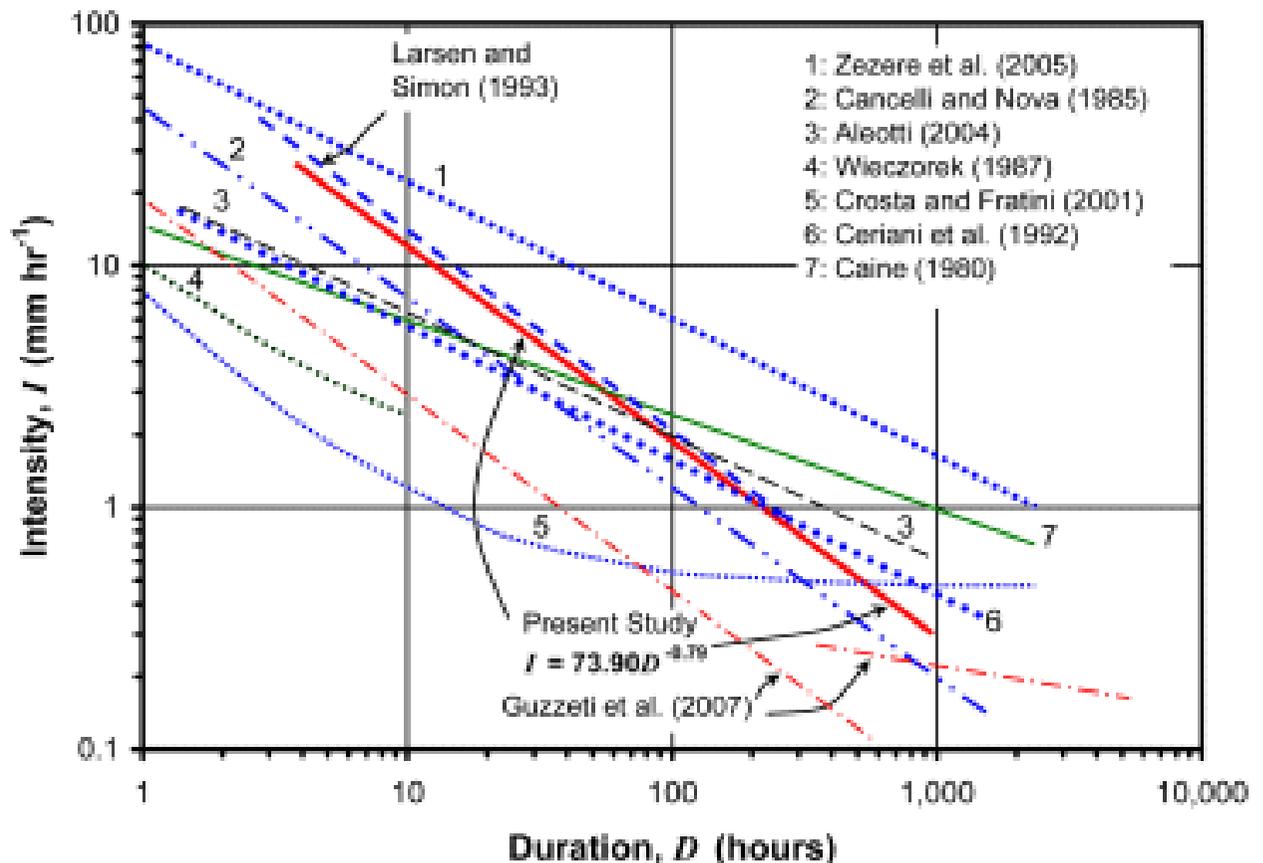
La pioggia s'infiltra tra i massi e incrementa il livello della falda al contatto con l'ammasso roccioso competente.

Difficoltà per la definizione dei parametri fisico – meccanici.

Frane superficiali - Innesco

Approccio Empirico

Esempio di soglie pluviometriche empiriche per la previsione dei fenomeni di instabilità superficiale



da Guzzeti et al., 2007

Frane superficiali - Innesco

FILTRAZIONE NON STAZIONARIA IN UN MEZZO NON SATURO

Equazioni di riferimento:

- Legge di Darcy
(Equazione di **TRASPORTO**)

$$\underline{q} = K(\vartheta) \underline{J} = K(\vartheta) \nabla \varphi$$

- Equazione di
CONSERVAZIONE DELLA MASSA

$$\nabla \cdot \underline{q} + \frac{\partial(nS)}{\partial t} = 0$$

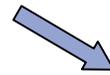
dove:

\underline{q} = vettore flusso [m/s]

\underline{J} = gradiente idraulico [-]

ψ = altezza di pressione = u / γ_w [m]

S = grado di saturazione [-]



EQUAZIONE DI RICHARDS

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \vartheta}{\partial \psi} = \nabla \cdot [K(\vartheta) \nabla \psi] + \frac{\partial K(\vartheta)}{\partial z}$$

$K(\vartheta)$ = conducibilità idraulica [m/s]

φ = quota piezometrica = $\psi + z$ [m]

n = porosità [-]

ϑ = contenuto volumetrico d'acqua = nS [-]

Frane superficiali - Innesco

FILTRAZIONE NON STAZIONARIA IN UN MEZZO NON SATURO

EQUAZIONE DI RICHARDS

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} \frac{\partial \vartheta}{\partial \psi} = \nabla \cdot [K(\vartheta) \nabla \psi] + \frac{\partial K(\vartheta)}{\partial z}$$



$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = A(\psi) (\nabla \psi)^2 + D(\psi) \nabla^2 \psi + A(\psi) \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

SOLUZIONE

MODELLI
SEMPLIFICATI
(Iverson)

METODI NUMERICI
COMPLETI
(FLAC^{3D}, SEEP/W)

dove:

$$D(\psi) = \frac{K(\vartheta)}{C(\vartheta)}$$

DIFFUSIVITA' [m²/s]

$$C(\vartheta) = \frac{d\vartheta}{d\psi}$$

CAPACITA' IDRICA [m⁻¹]

$$A(\psi) = \frac{dK(\vartheta)/d\psi}{C(\vartheta)}$$

[m/s]

Frane superficiali - Innesco

CALCOLO DELLA STABILITA' – PENDIO INDEFINITO

Equazione di riferimento:

Calcolo del **FATTORE DI SICUREZZA**

$$F.S. = F.S._c + F.S._f + F.S._w$$

con:

$$F.S._c = \frac{c'}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad = \text{fattore di sicurezza dovuto alla coesione}$$

$$F.S._f = \frac{\tan \varphi'}{\tan \alpha} \quad = \text{fattore di sicurezza dovuto all'attrito}$$

$$F.S._w = - \frac{\gamma_w \psi(Z, t) \tan \varphi'}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha} \quad = \text{fattore di sicurezza dovuto alle pressioni idrauliche}$$

dove:

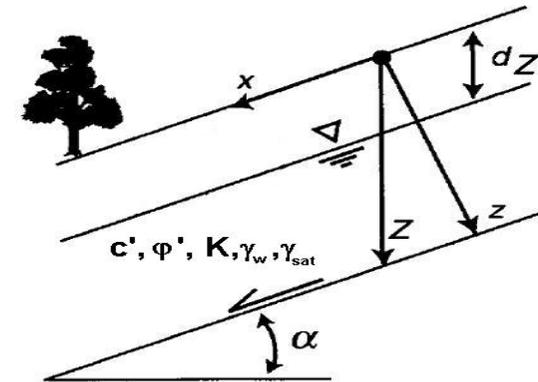
c' = coesione [kPa]

α = inclinazione del pendio [°]

φ' = angolo d'attrito [°]

$\psi(Z, t)$ = altezza di pressione [m]

γ_{sat} = peso di volume saturo del terreno [kN/m³] γ_w = peso di volume dell'acqua [kN/m³]



Frane superficiali - Innesco

STABILITA' VALUTATA CON LE EQUAZIONI CARDINALI DELLA STATICA

Componente idraulica del fattore di sicurezza :

$$F.S._w = - \frac{\gamma_w \psi(Z, t) \tan \varphi'}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha}$$



$$F.S._w(Z, t) = F.S._{w_0}(Z) + F.S.'_w(Z, t)$$

con:

$$F.S._{w_0}(Z) = - \frac{\psi_0(Z) \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha}$$

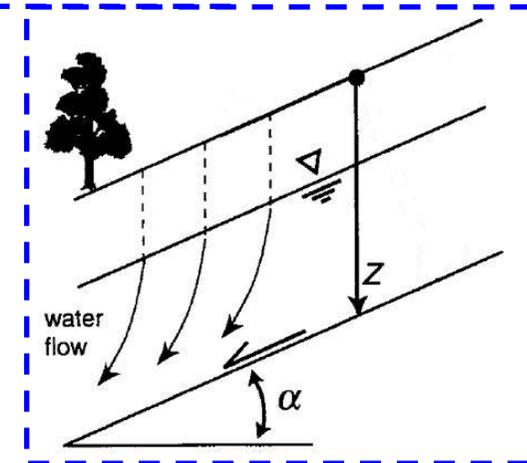
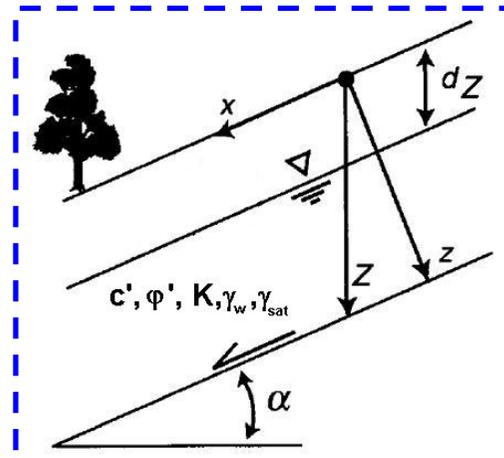


componente stazionaria

$$F.S.'_w(Z, t) = - \frac{[\psi(Z, t) - \psi_0(Z)] \gamma_w \tan \varphi'}{\gamma_{sat} Z \sin \alpha \cos \alpha}$$

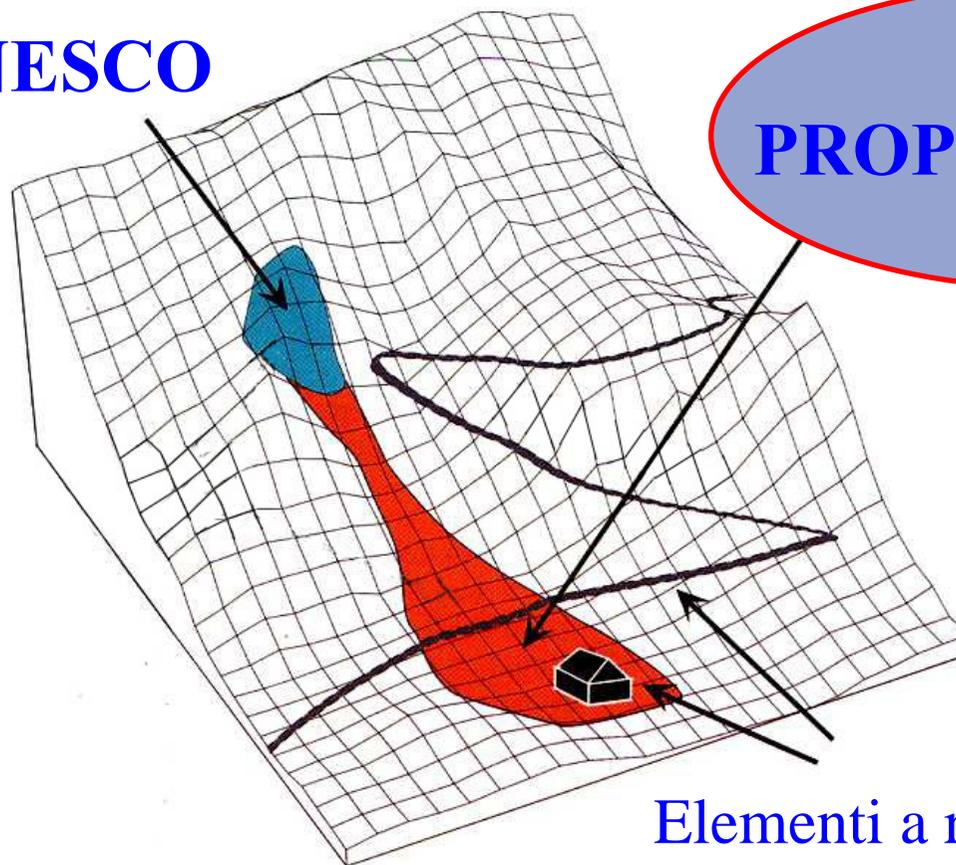


componente transitoria



Fasi di una frana

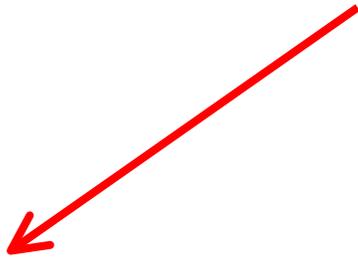
INNESCO



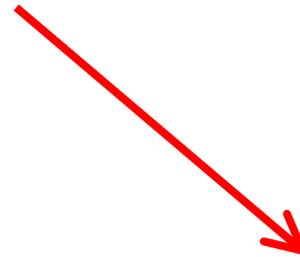
PROPAGAZIONE

Elementi a rischio

Frane superficiali – Propagazione rapida



- debris flow

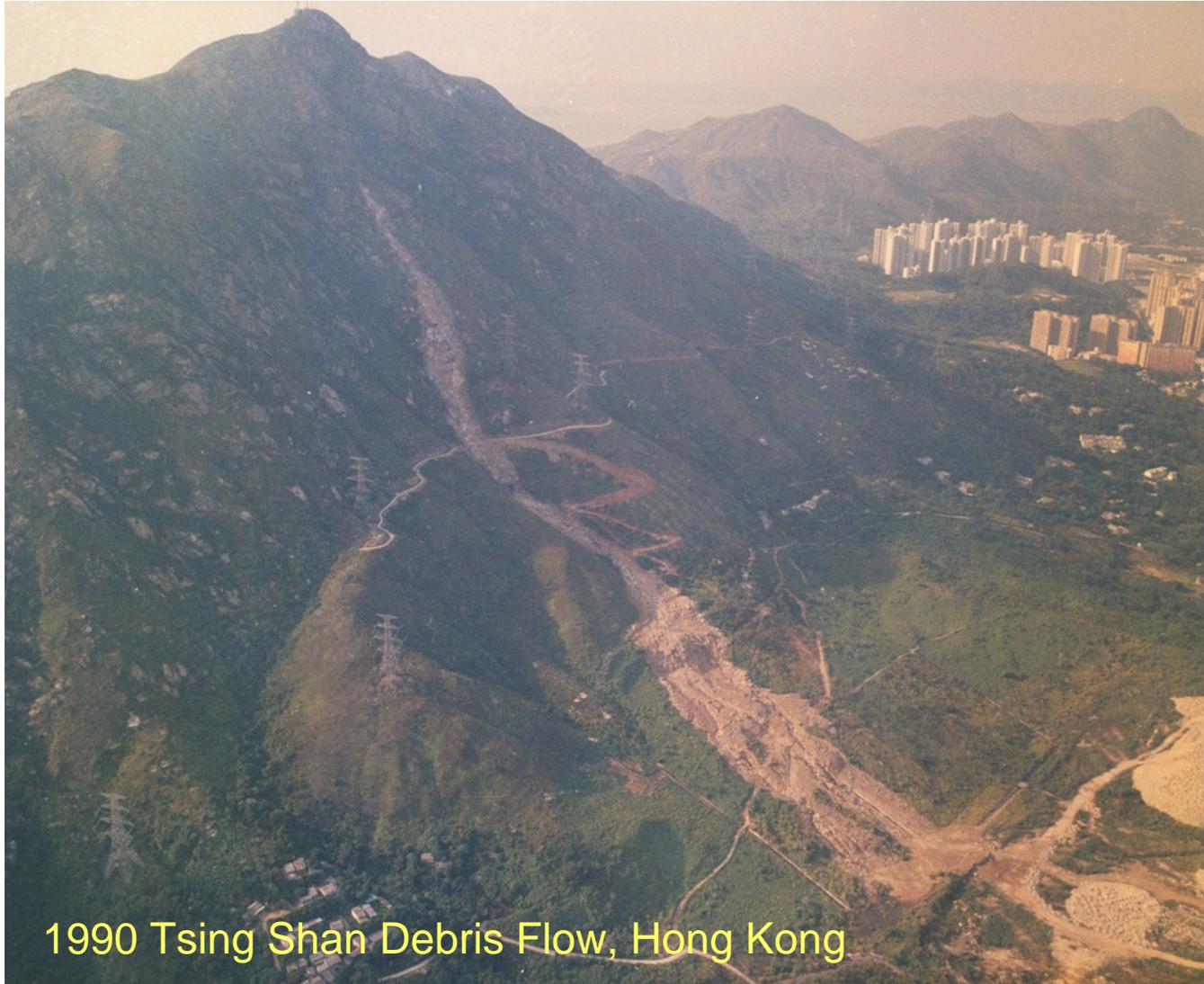


- mud flow

Particolarmente critica è la situazione in cui il materiale che si trova nell'alveo di un torrente o che vi arriva a causa di frane viene trascinato dalla corrente d'acqua

Propagazione

Esempi di debris flow

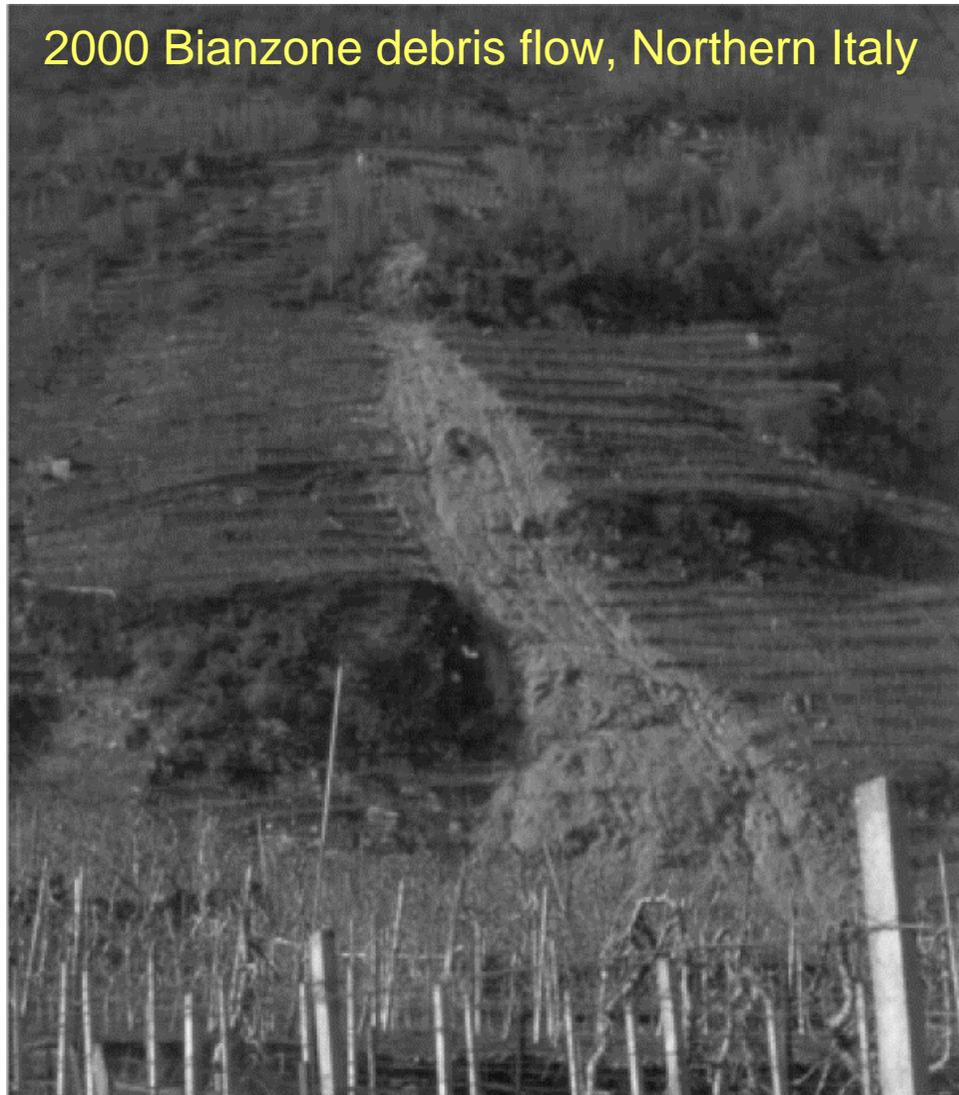


1990 Tsing Shan Debris Flow, Hong Kong

(image courtesy of GEO, Hong Kong)

Propagazione

Esempi di debris flow



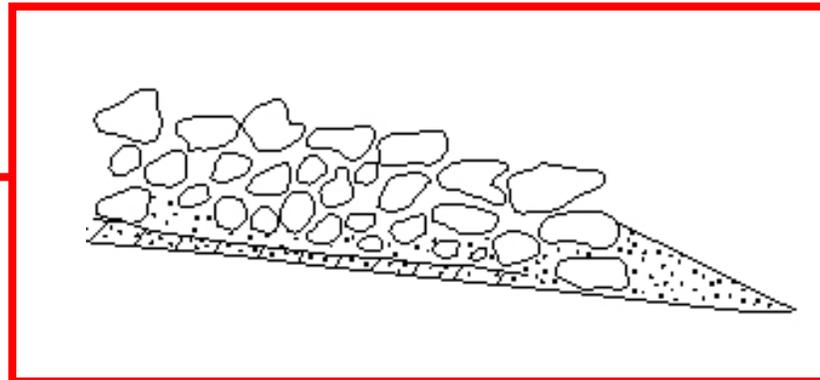
(after Chen et al., 2006)

Propagazione

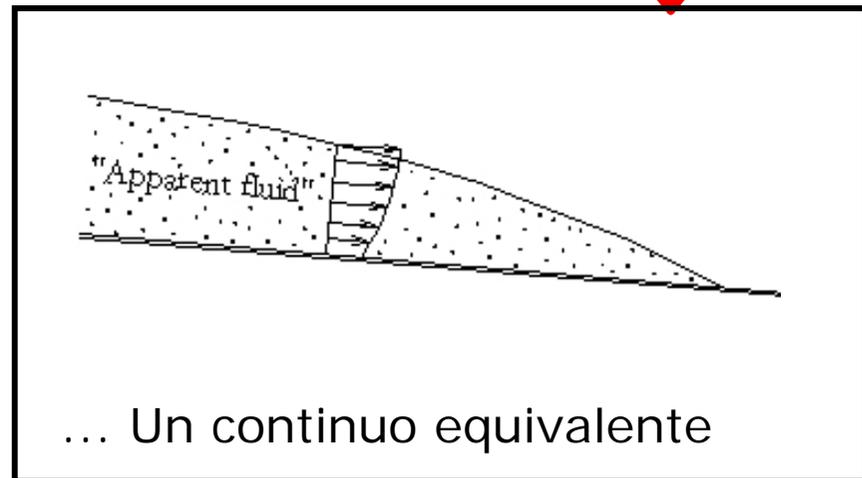
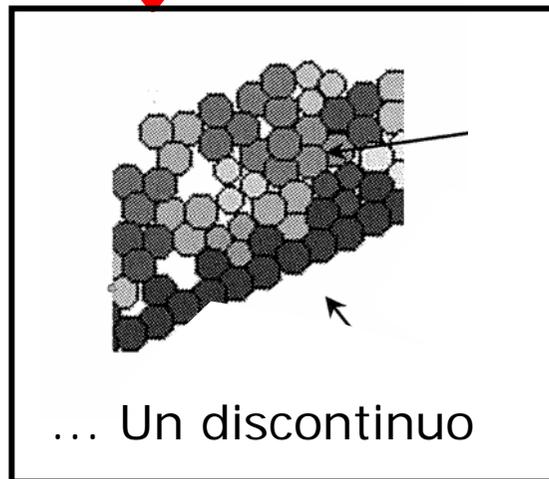
Esempi di mud flow



Propagazione: continuo vs. discontinuo

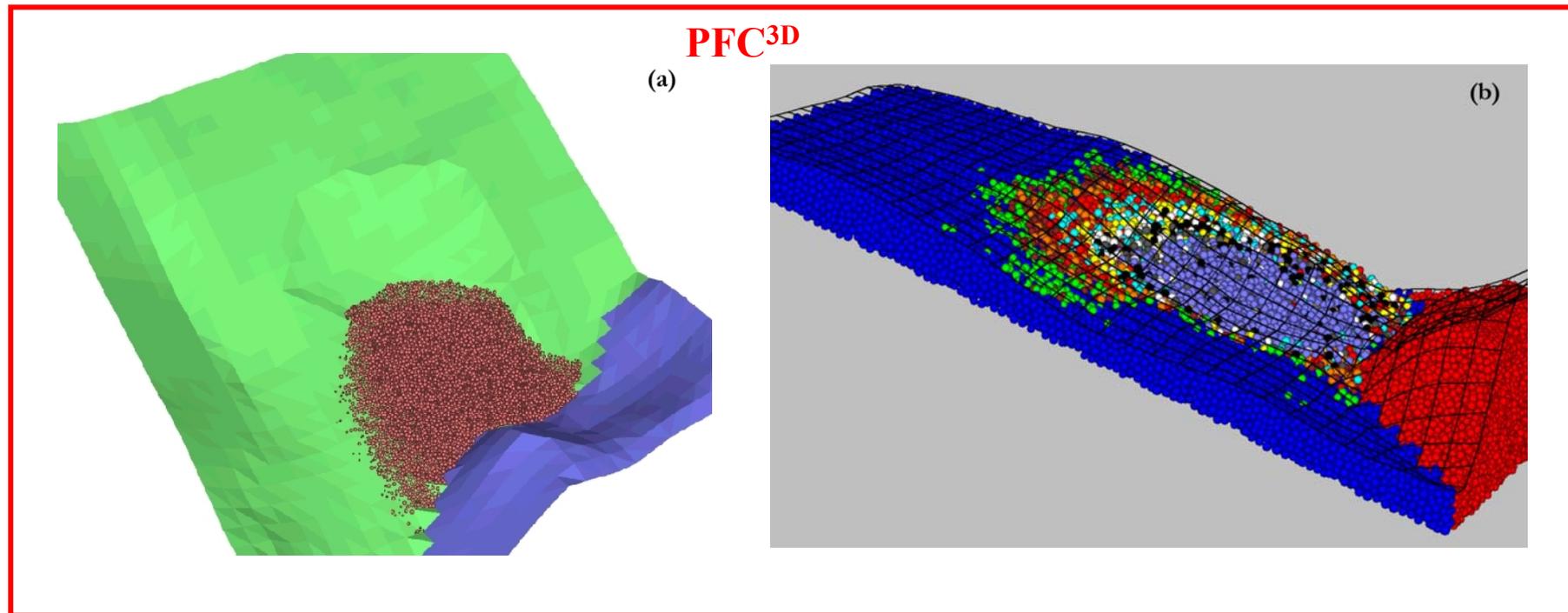


Dalla massa eterogenea reale a ...



Propagazione: Meccanica del discontinuo

La propagazione è modellata per mezzo di una insieme di particelle



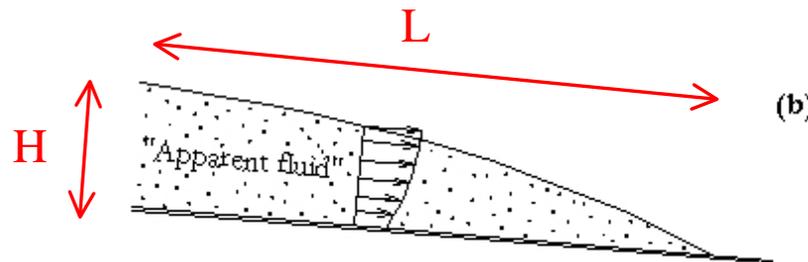
Propagazione: Meccanica del continuo

Ipotesi 1

Dalla massa eterogenea reale ad un continuo equivalente



Ipotesi 2



$$\frac{H}{L} \ll 1$$

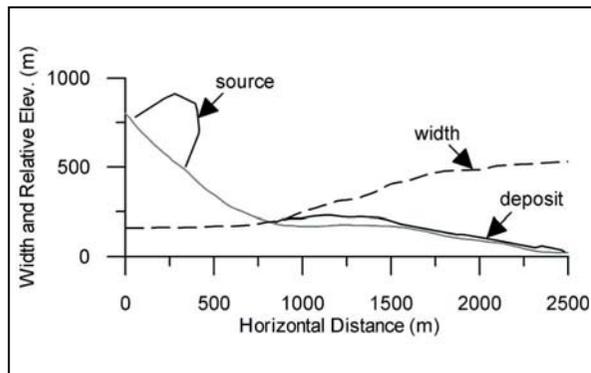
Depth averaged equations

Introdotta nel contesto della propagazione di materiale granulare da Savage and Hutter (1989)

Depth-averaged equations: 2D vs. 3D

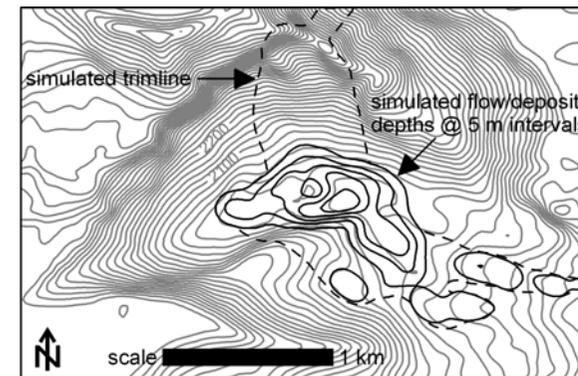
- **Depth-averaging** essenzialmente elimina una dimensione integrando le equazioni di bilancio nello spessore.
- Questo ha portato a incoerenze nelle terminologia.
Es., “3D” \equiv “depth-averaged 2D”
- Nell’ambito di questa presentazione, “2D” e “3D” semplicemente denotano modelli che simulano il moto su topografie 2D e 3D, rispettivamente.

2D



vs.

3D



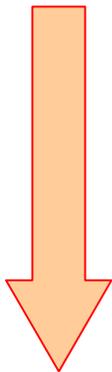
Depth-averaged equations: 2D vs. 3D

La massa è assunta incomprimibile e con densità costante, ρ .

In un sistema di riferimento legato alla topografia, le equazioni di massa e di conservazione della quantità di moto nella direzione x - e y - risultano essere le seguenti:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial h}{\partial t} + \text{div}(h\bar{\mathbf{u}}) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial t}(h\bar{u}) + \frac{\partial}{\partial x}(h\overline{u^2}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\bar{u}\bar{v}) = \gamma_x gh + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(h\overline{\sigma_{xx}}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(h\overline{\sigma_{xy}}) \\ \frac{\partial}{\partial t}(h\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(h\bar{u}\bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(h\overline{v^2}) = \gamma_y gh + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial x}(h\overline{\sigma_{xy}}) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial y}(h\overline{\sigma_{yy}}) \end{array} \right.$$

$$\sigma_{zz} = \rho g \gamma_z (h - z)$$



$$\bar{\mathbf{u}} = (\bar{u}, \bar{v})$$

h

γ_i

$$T_{ii} = \sigma_{iz}$$

velocità media

spessore della massa

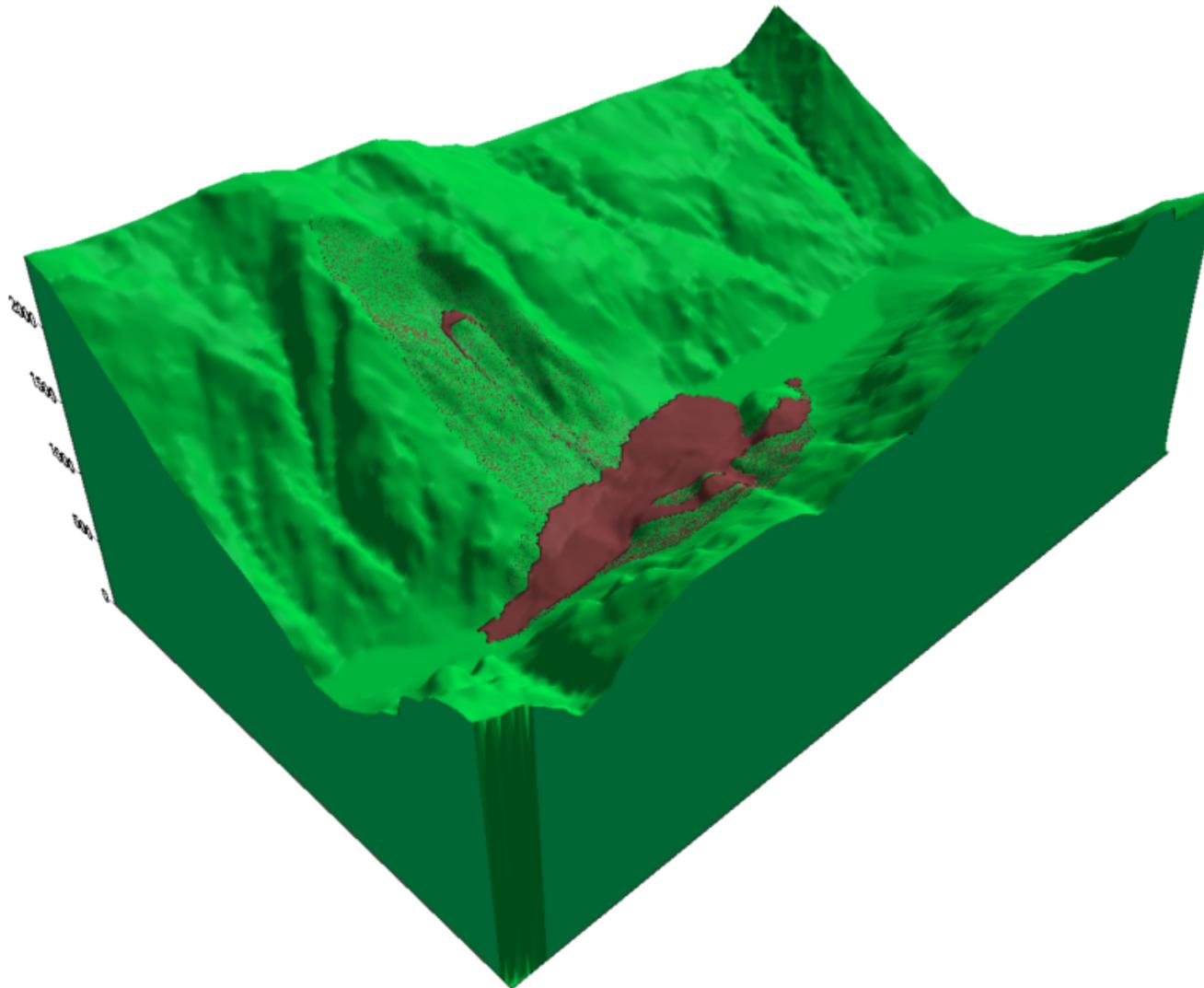
coefficienti di proiezione del vettore gravità \mathbf{g}

termine di resistenza alla base

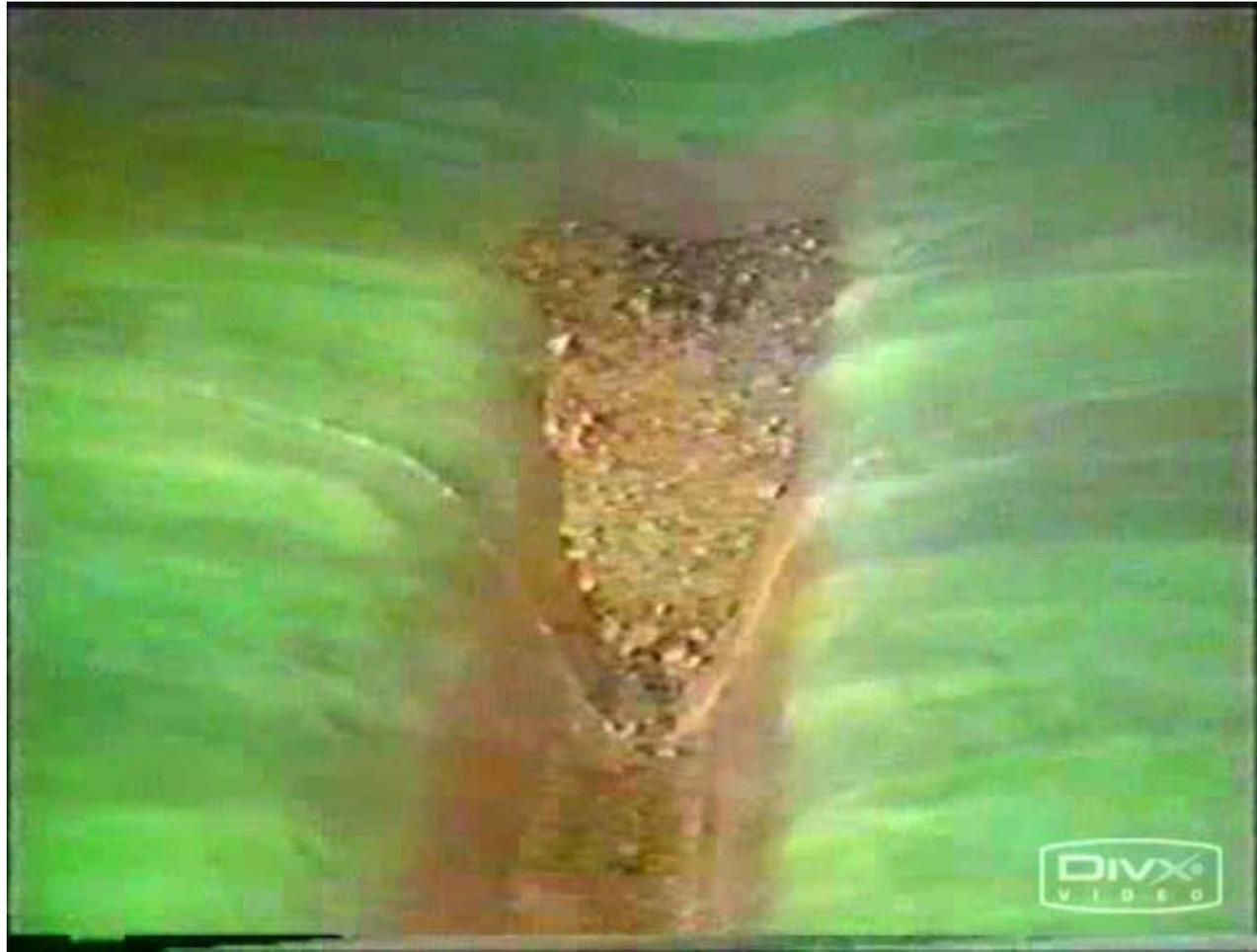
Implementazione numerica ricorrendo a mesh e risolutori diversi

Propagazione

SIMULAZIONE DELLA FRANA DELLA VAL POLA MEDIANTE CODICE DI CALCOLO RASH3D (Pirulli, 2005)



Propagazione



...GRAZIE PER L'ATTENZIONE...



FRANE INDOTTE DA PRECIPITAZIONI: PREVISIONE E PREVENZIONE

Seminario organizzato nell'ambito del Corso Integrato di
Protezione Idraulica del Territorio e Sistemazioni Idrauliche

Meccanismi e tipologie di instabilità nelle coltri superficiali

Prof. Claudio Scavia

**Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica
POLITECNICO DI TORINO**