



Flooding in Huila, Colombia - February 2017. Credit: UNGRD

# LA REOLOGIA

nelle colate detritiche

# Concetti di base

**La reologia è la scienza che si occupa della deformazione e del flusso della materia (Bingham, 1929)**

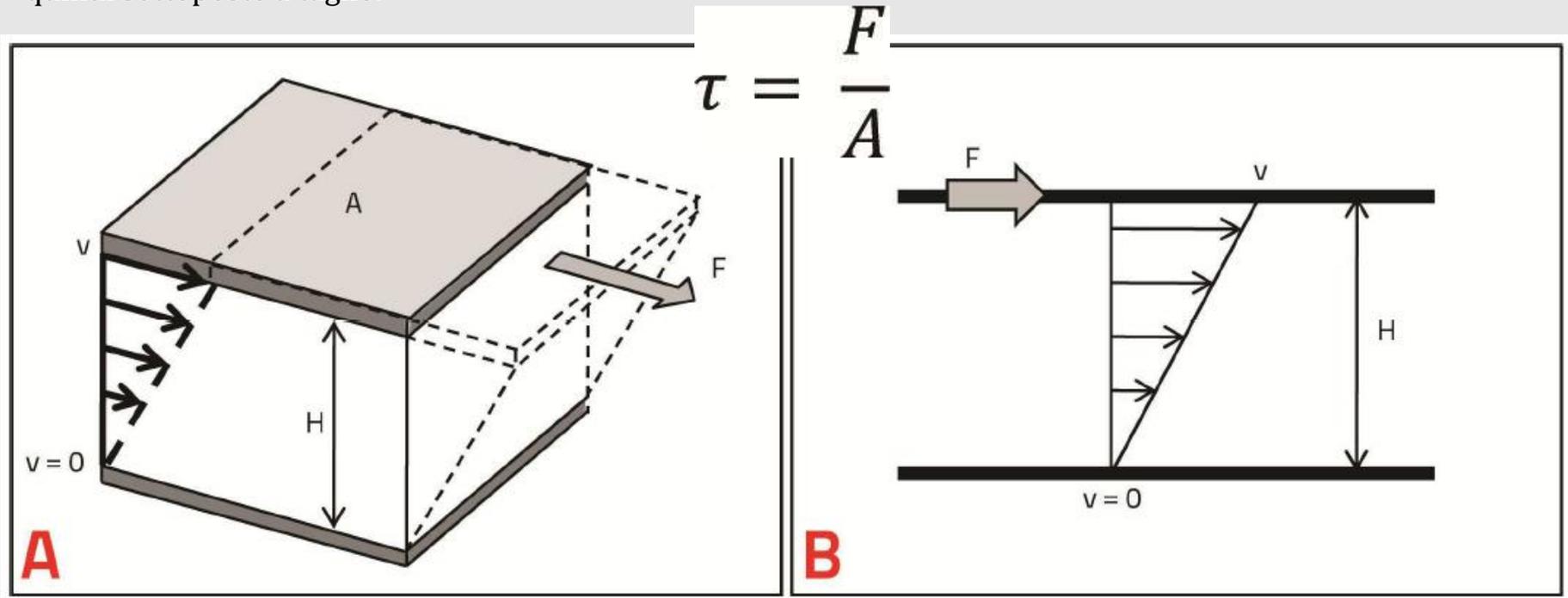
Lo studio del comportamento dei fluidi in funzione delle loro caratteristiche di deformazione e deformabilità è oggetto della reologia. **Il movimento dei fluidi viene analizzato esaminando i loro spostamenti e le deformazioni in funzione del tempo.** In generale vengono sfruttati tre principi fondamentali: conservazione della massa, conservazione dell'energia, conservazione della quantità di moto; a questi si affiancano le equazioni costitutive che descrivono le proprietà fisiche dei fluidi sotto varie condizioni e stati.

**La caratterizzazione reologica dei debris flow permette la quantificazione della forza di impatto e la stima della capacità di propagazione del flusso**, fattori alla base dei modelli numerici e fisici che permettono la delimitazione delle aree di pericolo e la progettazione di adeguate opere di difesa.

# Concetti di base

Il comportamento di un fluido, sottoposto a flusso, è espresso dalla cosiddetta **curva di flusso**, che definisce la relazione tra la velocità di deformazione ( $\dot{\gamma}$ ) e lo sforzo di taglio ( $\tau$ ), o dalla **curva di viscosità**, la quale esprime la relazione tra la velocità di deformazione e la viscosità ( $\eta$ ).

Questi tre parametri possono essere definiti utilizzando il cosiddetto **modello a due piatti**. In tale modello il fluido è posto in mezzo a due piatti, separati da un gap ridotto ( $H$ ). Il piatto di base è fisso, mentre il piatto superiore, di area ( $A$ ) viene fatto muovere con una velocità ( $v$ ) applicando una forza ( $F$ ). Il fluido interno è quindi sottoposto a taglio.



Modello a due piatti per la definizione dei parametri reologici: (A) modello in 3D (da Schatzmann, 2005); (B) modello in 2D.

# Concetti di base

## Materiali solidi:

L'applicazione di uno sforzo  $\tau$  produce una deformazione  $\gamma$  che è linearmente proporzionale al valore istantaneo dello sforzo stesso.

## Materiali liquidi:

L'applicazione di uno sforzo  $\tau$  produce una condizione di flusso, caratterizzata da una velocità di deformazione  $\dot{\gamma}$  (ovvero da un gradiente di velocità) che è linearmente proporzionale al valore istantaneo dello sforzo stesso.

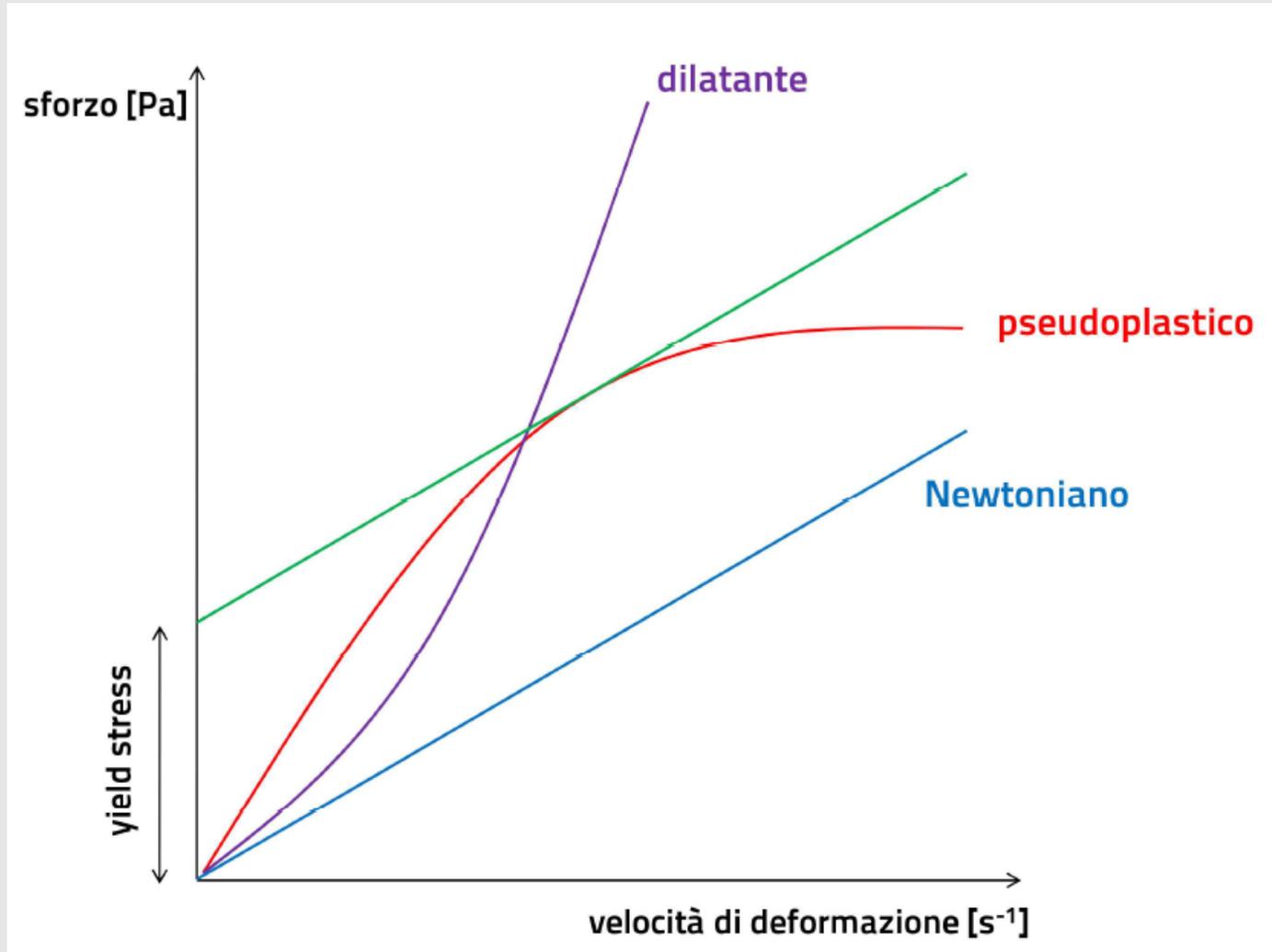
La distribuzione delle velocità all'interno del fluido è lineare se sono rispettate tre condizioni: il fluido deve aderire alla superficie dei piatti (*no slip*), il flusso è in regime laminare e il gap tra i piatti è ridotto. In queste condizioni i parametri reologici sono così definiti:

$$\dot{\gamma} = \frac{v}{H} \quad \tau = \frac{F}{A} \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

Il comportamento delle curve di flusso e di viscosità può essere più o meno complesso, in funzione del range di velocità di deformazione analizzato e, soprattutto, del tipo di fluido studiato. Dal punto di vista matematico, ciò comporta equazioni costitutive da semplici a molto complesse.

# Curve di flusso

In funzione delle caratteristiche delle curve di flusso, è possibile classificare i vari fluidi



# Curve di flusso

Si definiscono **Newtoniani** i fluidi la cui curva di flusso è descritta da una funzione lineare (1), in cui la viscosità è una grandezza costante.

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

Se la viscosità di un fluido varia in funzione dello sforzo di taglio applicato, allora il fluido è definito **non-Newtoniano**. I fluidi non-Newtoniani si distinguono a loro volta in fluidi *powerlaw* (2) e fluidi *yield stress* (3).

$$\tau = m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (2)$$

In cui  $m$  è un coefficiente che indica la consistenza del fluido: più elevato è il valore di  $m$ , più il fluido è viscoso. Al variare di  $n$ , invece, si riconoscono diversi comportamenti reologici:

- $n > 1$ , la resistenza al taglio aumenta all'aumentare della deformazione, il fluido è definito dilatante;
- $n < 1$ , la resistenza diminuisce all'aumentare della deformazione, il fluido è detto pseudoplastico.

# Curve di flusso

I fluidi *yield stress* sono caratterizzati dalla presenza di un valore di sforzo, definito appunto *yield stress* ( $\tau_y$ ), che deve essere superato affinché avvenga effettivamente il movimento del fluido.

$$\tau = \tau_y + m \cdot \dot{\gamma}^n \quad (3)$$

Le colate di detrito sono sistemi che hanno un comportamento non-Newtoniano.

# Yield stress

Il concetto di yield stress, limite di scorrimento o tensione di soglia, fu introdotto per la prima volta da **Schwedoff (1890)** nell'ambito del suo lavoro sperimentale su soluzioni di gelatina colloidale. Il comportamento dei fluidi yield stress è comunemente associato agli studi di **Bingham (1922)**, che propose il termine per descrivere il flusso delle pitture.

L'yield stress è il valore di sforzo di taglio per cui il fluido subisce un repentino cambiamento di comportamento.

Dal punto di vista ingegneristico è il valore al di sotto del quale il fluido subisce deformazioni plastiche e al di sopra del quale il fluido scorre (Coussot & Boyer, 1995). In questa prospettiva l'yield stress segna il limite tra un comportamento di tipo solido, e quindi elastico, ed un comportamento di tipo liquido, e quindi viscoso (Ancy, 2007).

# Yield stress

**La sua determinazione non è semplice ed immediata**, ma è di significativa importanza per lo studio di fenomeni quali i debris flow. La sua corretta quantificazione è problematica in quanto esistono diversi metodi sia per definirlo, basti pensare alla differenza tra yield stress statico e yield stress dinamico, che per misurarlo (Boccali, 2013, PhD Thesis).

Si possono calcolare diversi valori di yield stress per il medesimo materiale (Nguyen et al., 2006).

**Una soluzione unica non può essere facilmente individuata poiché la transizione da uno stato deformativo ad una condizione di flusso è distribuita lungo un ampio intervallo di sforzi**, comunemente più largo del corrispondente intervallo di deformazione, ed è dipendente dalla storia reologica del materiale.

Nel caso di sospensioni particellari o di altre dispersioni eterogenee, la larghezza dell'intervallo di sforzo, i suoi limiti inferiore e superiore, nonché la forma della transizione reologica dipendono fortemente dalle caratteristiche e dalla concentrazione della fase dispersa.

# Viscosità

**E' una proprietà dei fluidi che indica la resistenza allo scorrimento. E' una misura dell'attrito interno che un fluido oppone al moto.** Un fluido ha una viscosità tanto più elevata quanto più alto è l'attrito interno che gli elementi di fluido incontrano scorrendo gli uni sugli altri, cioè quanto più alti sono gli sforzi da applicare per mantenere in moto il fluido ad una data velocità.

La viscosità presa in considerazione è la viscosità dinamica o apparente, quella che può essere definita pensando ad un moto di scorrimento (o viscometrico o di taglio o a shear), che può essere schematizzato come un insieme di lamine sottili che si muovono le une sopra le altre (Gardini et al., 2006).

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

# Concentrazione volumetrica solida

E' definita da:

$$C_v = \frac{V_s}{V_s + V_w}$$

dove  $V_s$  è il volume dei solidi e  $V_w$  il volume dell'acqua.

**Costa (1984)**, da un confronto di valori ricavati da diversi autori, associa i fenomeni di colata detritica a concentrazioni volumetriche solide comprese tra **0.25 e 0.86**, pari a concentrazioni in peso comprese tra 0.35 e 0.90.

Tali intervalli vengono ridotti da **Iverson (1997)** che riporta un intervallo di concentrazione dei solidi compreso tra **0.40 e 0.80**, ma non nega la possibilità di una maggior diluizione.

**Bagnold (1954)** afferma che l'acqua mantiene caratteristiche di fluido Newtoniano fino ad una concentrazione di solidi pari a **0.09**; mentre a concentrazioni maggiori il fluido assume comportamento non-Newtoniano a causa delle interazioni tra i grani.

**Bardou et al. (2006)** analizzano l'influenza di tale parametro sui valori di yield stress e viscosità, derivati da analisi reologiche con due diversi apparati reometrici. Gli esperimenti confermano una dipendenza lineare dal valore di yield stress dal valore di  $C_v$ , mentre la viscosità mostra un comportamento non lineare, anche in funzione dei diversi tipi di minerali argillosi analizzati.

# I modelli reologici

Nella prassi si incontrano molti fenomeni che non trovano alcuna possibile spiegazione negli approcci classici quali la teoria dell'elasticità e la meccanica dei fluidi Newtoniani.

L'argomento centrale della reologia è quindi la definizione di altre equazioni costitutive o **modelli reologici** diversi dalle semplici leggi lineari (Newton, Hooke).

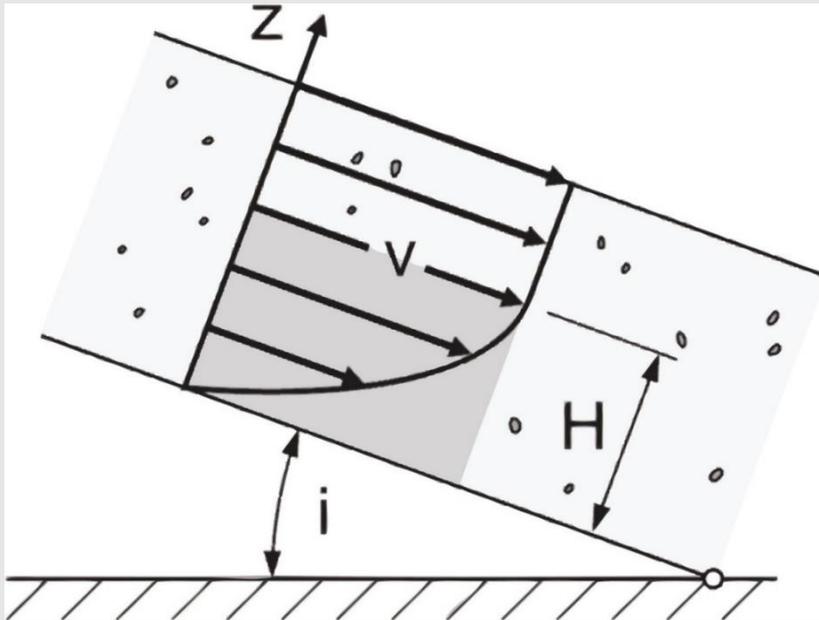
Con che scopo?????

- Interpretare fenomeni macroscopici
- Analizzare e risolvere problemi di trasporto o nei quali è in gioco il moto o la deformazione di sistemi.
- Fornire criteri e parametri utili.

Nel caso di colate di fango o di detrito risulta difficile comprendere a che tipo di regime faccia riferimento il flusso in quanto non sembrano più valere i parametri tipici impiegati in presenza di trasporto solido e di correnti liquide a basse concentrazioni solide (Locat, 1997). Quando le concentrazioni solide nel fluido superano **circa il 9%** in volume (Bagnold, 1954), sembra più corretto impiegare il regime individuato dai modelli reologici che fanno riferimento alle caratteristiche viscose o granulo-inerziali del mezzo.

# Distribuzione semplificata del profilo verticale di velocità in una colata detritica

Schatzmann, 2005



La distribuzione di velocità ( $v$ ) all'interno di una colata detritica può essere illustrata in maniera semplificata, assumendo che il comportamento reologico sia descrivibile con un semplice modello plastico (Bingham o Herschel-Bulkley).

Il flusso può essere diviso in una **regione di spessore  $H$** , adiacente al fondo, caratterizzata da un **incremento rapido delle velocità** (con profilo parabolico nel caso di fluidi di tipo Bingham), e in **una restante regione più prossima alla superficie, avente la stessa velocità e quindi non deformata**.

**La superficie di divisione tra zona di flusso e zona indeformata è determinata dai valori dello *yield stress* e della densità del materiale, dall'inclinazione del piano, che regola la componente attiva della forza peso dello strato piano, e dallo spessore di quest'ultimo.**

# I modelli reologici

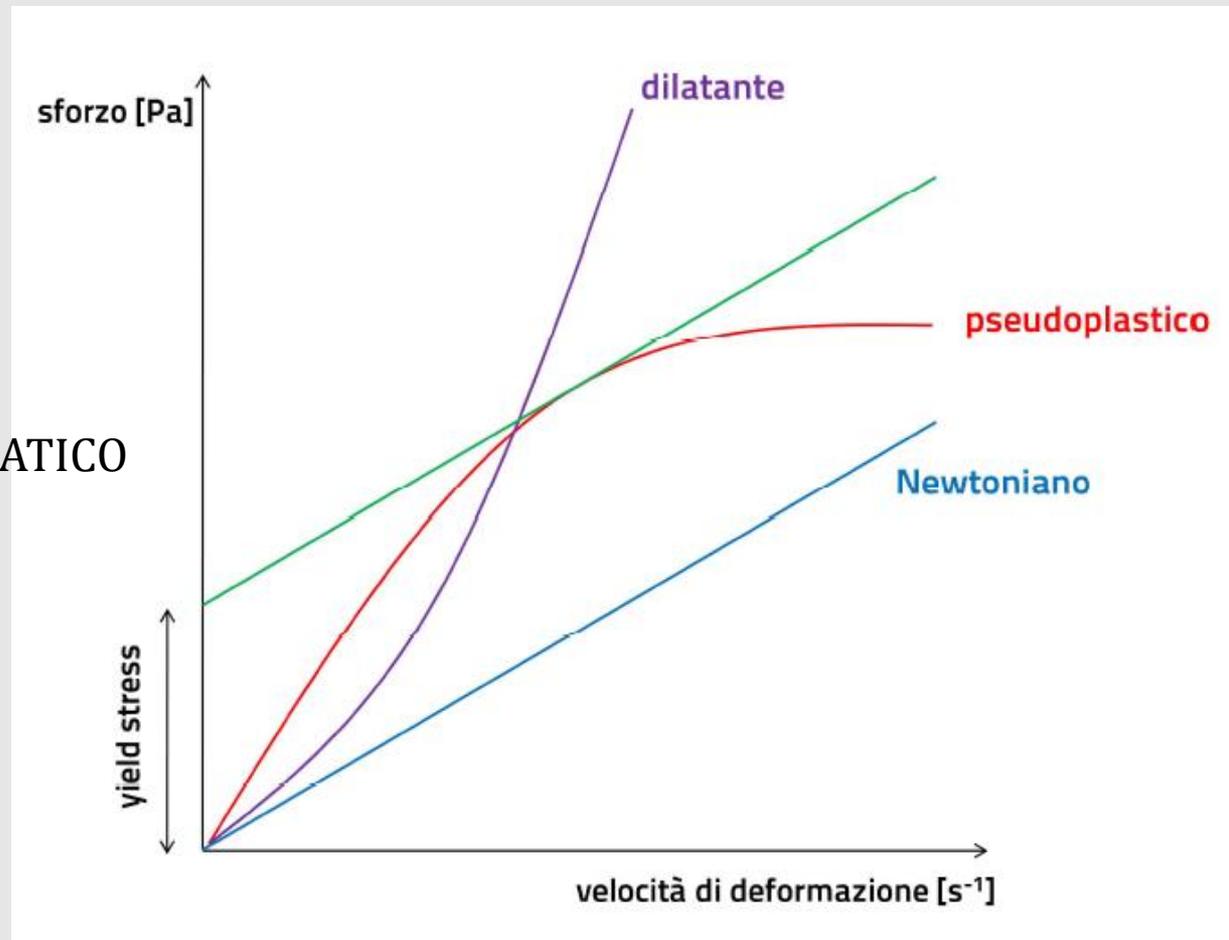
Correntemente i modelli reologici più utilizzati in letteratura per la descrizione delle colate sono:

MODELLO NEWTONIANO

MODELLO PLASTICO

MODELLO DILATANTE

MODELLO REOLOGICO QUADRATICO



# MODELLO NEWTONIANO

E' il modello più semplice per la descrizione dei debris flow. Prevede una **dipendenza lineare dello sforzo di taglio dalla velocità di deformazione, regolata dalla viscosità.**

Il profilo di velocità è di tipo parabolico e il valore di velocità massima si raggiunge in prossimità della superficie.

Se da un lato **il modello** rappresenta degli indubbi vantaggi, dovuti alla semplicità, dall'altro **non spiega né la formazione di argini e lobi su pendenze relativamente alte (> 10°), né la presenza del *plug rigido*, né la gradazione inversa dei depositi (Cesca, 2008).**

$$\tau = \eta \frac{du}{dy}$$

$\tau$ : resistenza al taglio

$\tau_y$ : yield stress

$\eta$ : viscosità

$du/dy$ : velocità di deformazione

$C$ : costante tipica del fluido analizzato

# MODELLO PLASTICO

Johnson (1970) ha sviluppato un modello reologico di tipo viscoso-plastico secondo il quale la resistenza opposta al flusso (o resistenza alla deformazione) di una colata detritica è funzione della coesione, dell'angolo di attrito interno e della viscosità. In condizioni statiche la resistenza è esercitata dai primi due termini, mentre in condizioni dinamiche da tutti e tre i fattori. Le equazioni di base di questo modello sono l'equazione di Coulomb e quella del fluido Newtoniano-viscoso, che combinate assumono la seguente relazione:

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi + \eta_N \dot{\gamma}$$

Esprimendo la resistenza limite al taglio (yield stress) come  $\tau_y$  e riscrivendo l'equazione secondo il modello viscoso-plastico di Bingham, in cui la viscosità è definita come viscosità dinamica di Bingham, si ottiene:

$$\tau = \tau_y + \eta_{\infty} \dot{\gamma}$$

La distribuzione di velocità è di tipo parabolico fino ad un certo spessore di sedimento, nella parte basale, mentre al di sopra si crea uno strato di materiale che si muove con velocità uniforme in assenza di deformazione interna (*rigid plug*).

# MODELLO PLASTICO

L'equazione di **Bingham** è il più semplice modello capace di descrivere un comportamento viscoso di tipo plastico e presenta, quindi, alcune limitazioni, che non sono legate alla sua semplicità ma, principalmente, al fatto che **non rende possibile la stima del contributo che le particelle grossolane, in particolare le collisioni tra esse, danno al movimento complessivo del debris flow. Esso, infatti, assume che il trasporto e la dissipazione di energia siano esclusivamente a carico degli stress viscosi** (Iverson, 1997).

Alcune immagini tratte dal web: Bargeggi, barriera debris flow (Geoprodotti), un conoide stabilizzato ed infrastrutturato in Cina; un conoide ritratto dalla Michigan Technological University.



# MODELLO DILATANTE

Basandosi sul concetto di pressione dispersiva di Bagnold (1954), Takahashi (1978, 1980, 1981) definisce la **resistenza al taglio di un debris flow come funzione di P (pressione dispersiva) e  $\theta$  (angolo d'attrito interno dinamico)**:

$$\tau = P \tan \theta$$

Tale modello spiega in modo qualitativo la gradazione inversa tipica dei depositi da debris flow.

**Gli esperimenti di Bagnold dimostrano che, quando una miscela con concentrazione relativamente alta di solidi granulari è in movimento, le particelle più grossolane tendono a migrare verso la superficie.** La forza di sollevamento che, per effetto delle collisioni, porta i grani verso l'alto, viene appunto chiamata **pressione dispersiva**. Bagnold definisce tale pressione proporzionale al quadrato del diametro e al gradiente di velocità (velocità di deformazione):

$$P = 0.042 \delta D^2 \dot{\gamma}^2 \cos \theta$$

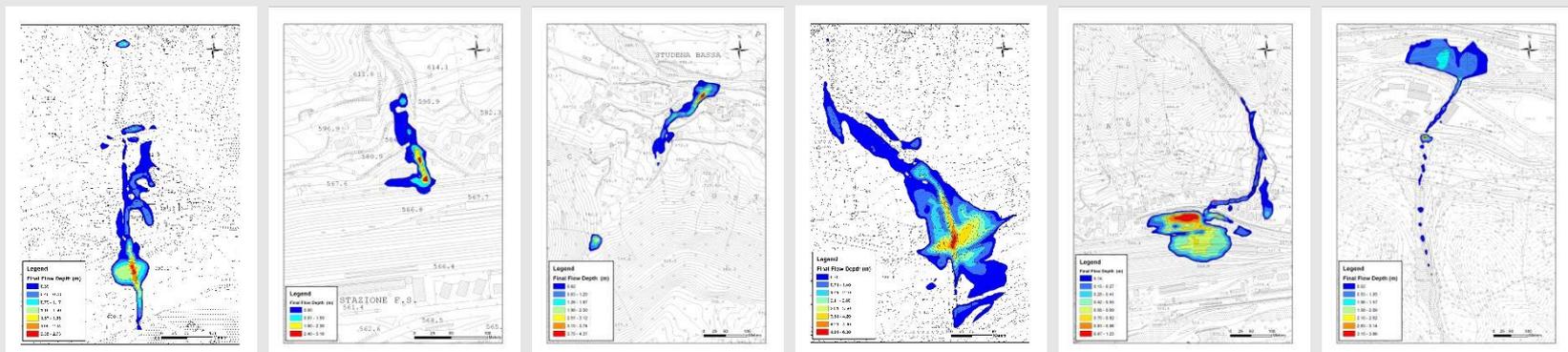
$$\delta = \frac{C_V^{1/3}}{(C_{\max})^{1/3} - C_V^{1/3}}$$

dove  $D$  è il diametro delle particelle e  $\delta$  è la concentrazione lineare dei granuli, funzione a sua volta della concentrazione volumetrica ( $C_V$ ) e della massima concentrazione possibile ( $C_{\max}$ ).

# MODELLO REOLOGICO QUADRATICO

E' impiegato nel programma di calcolo FLO-2D (O'Brien, 2003) ed è proposto per la simulazione dei processi di flusso e deposizione di mudflow e di flussi iperconcentrati fangosi.

Entrambi i flussi sono trattati come bifasici: una fase è composta dal fluido (fango), costituito da acqua e particelle fini, l'altra è la fase solida, contenente tutti i grani più grossolani. La presenza di entrambe le fasi fa sì che, in funzione della concentrazione di sedimenti e della velocità, possano dominare alternativamente sforzi viscosi o sforzi turbolenti. Il modello proposto da O'Brien & Julien (1985) permette di descrivere la continuità dei regimi di flusso da viscoso a turbolento/dispersivo come funzione della concentrazione di sedimento.



# Raccolta del campione, e sua preparazione per le analisi di laboratorio

Per effettuare le analisi reologiche è necessario separare dalla frazione fine di ciascun campione un'aliquota significativa composta da particelle inferiori ai **62.5  $\mu\text{m}$** . Tale operazione viene realizzata tramite setacciatura per via umida del materiale sabbioso-limoso (setaccio A.S.T.M. Series, Mesh/n°230, Giuliani, Torino). Previa decantazione, viene rimossa l'acqua in eccesso e il campione viene asciugato in forno a 110°C per 18-24 ore.

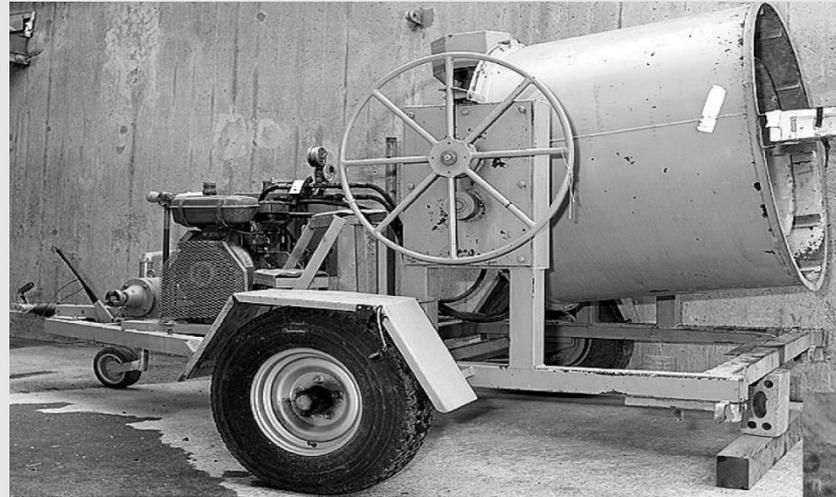
**48 ore prima delle analisi reologiche il campione viene preparato alla concentrazione volumetrica fissata**, mescolando le adeguate quantità di materiale argilloso-limoso ed acqua distillata. Il campione così realizzato viene sigillato con *parafilm* onde prevenire l'evaporazione dell'acqua.

Al fine di ricavare, tramite curve di interpolazione, i coefficienti necessari alla modellazione numerica, ogni campione deve essere analizzato a diverse concentrazioni volumetriche, almeno tre per ottenere dati sufficienti ad una buona correlazione. A seconda della mineralogia del materiale analizzato sono stati scelti diversi valori di concentrazione, nel complesso racchiusi in un *range* dal 26% al 64% in volume.

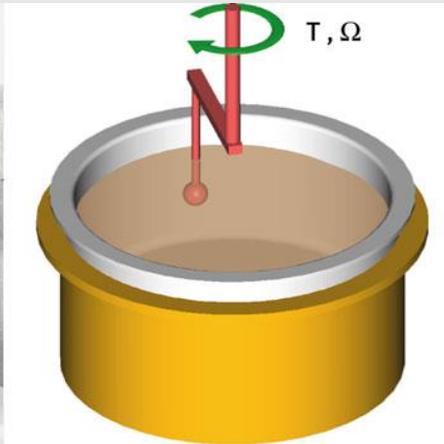
# Alcuni reometri



Si possono analizzare frazioni granulometriche fini  $<62.5 \mu\text{m}$



Permettono di analizzare miscugli di acqua e sedimento con granulometria massima di 20-35 mm.



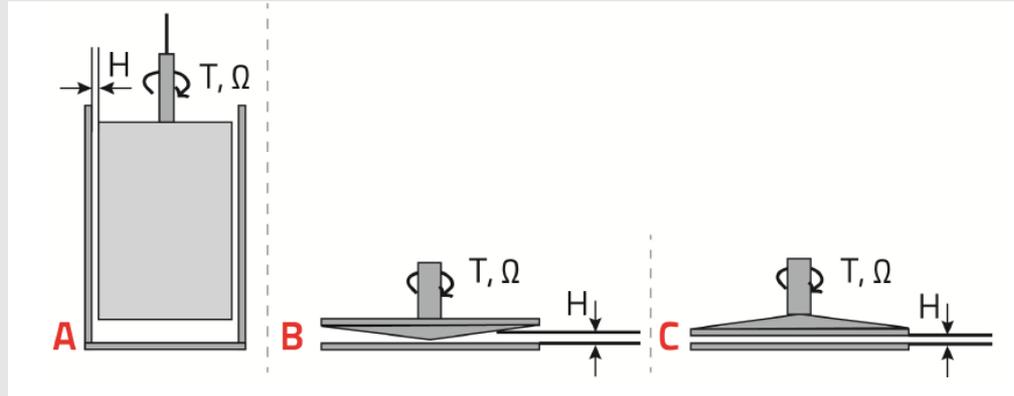
Rispetto ai reometri convenzionali è possibile analizzare granulometrie fino a 5 mm utilizzando però ridotte quantità di campione (0.5 l).

Il canale artificiale in cemento armato, costruito dallo U.S. Geological Survey presso l'H.J. Andrews Experimental Forest in Oregon (Stati Uniti), è lungo 95 m, largo 2 m e profondo 1,2m.



Canale artificiale dell'U.S. Geological Survey (Iverson et al., 1992)

# Reometria a piccola scala



**Configurazioni geometriche dei sistemi reometrici:** (A) sistema a cilindri concentrici; (B) sistema cono-piatto; (C) sistema a piatti paralleli (modificata da Schatzmann, 2005).

Le analisi reologiche sono state effettuate tramite il reometro a stress controllato (Rheostress Haake RS150, Haake GmbH, Germania), equipaggiato con un sistema a piatti paralleli, di diametro pari a 35 mm, aventi le superfici zigrinate per prevenire o almeno contrastare il fenomeno di *wall-slip* alla parete.

Il gap tra i due piatti è stato mantenuto pressoché costante attorno ai 2 mm. Tale strumento permette di sottoporre il campione a diverse condizioni di stress, sia in regime oscillatorio sia in continuo.

# Tecniche analitiche

**Creep test:** con tali prove il campione è sottoposto all'azione di uno sforzo costante nel tempo e si misura la sua risposta in termini di deformazione o velocità di deformazione. Valori differenti dello sforzo applicato possono essere scelti in modo da ricoprire l'intervallo in cui è contenuto, presumibilmente, il valore di yield stress. Se il valore di sforzo è inferiore all'yield stress, la deformazione del campione è piccola e cresce molto lentamente, tendendo asintoticamente ad un valore costante (comportamento di tipo solido viscoelastico) o, altrimenti, ad una condizione di flusso caratterizzata da velocità di deformazione molto basse (comportamento di tipo liquido viscoelastico); mentre, se lo sforzo tangenziale supera il valore critico (yield stress), la deformazione diverge tendendo a valori molto grandi (Nguyen et al., 2006).

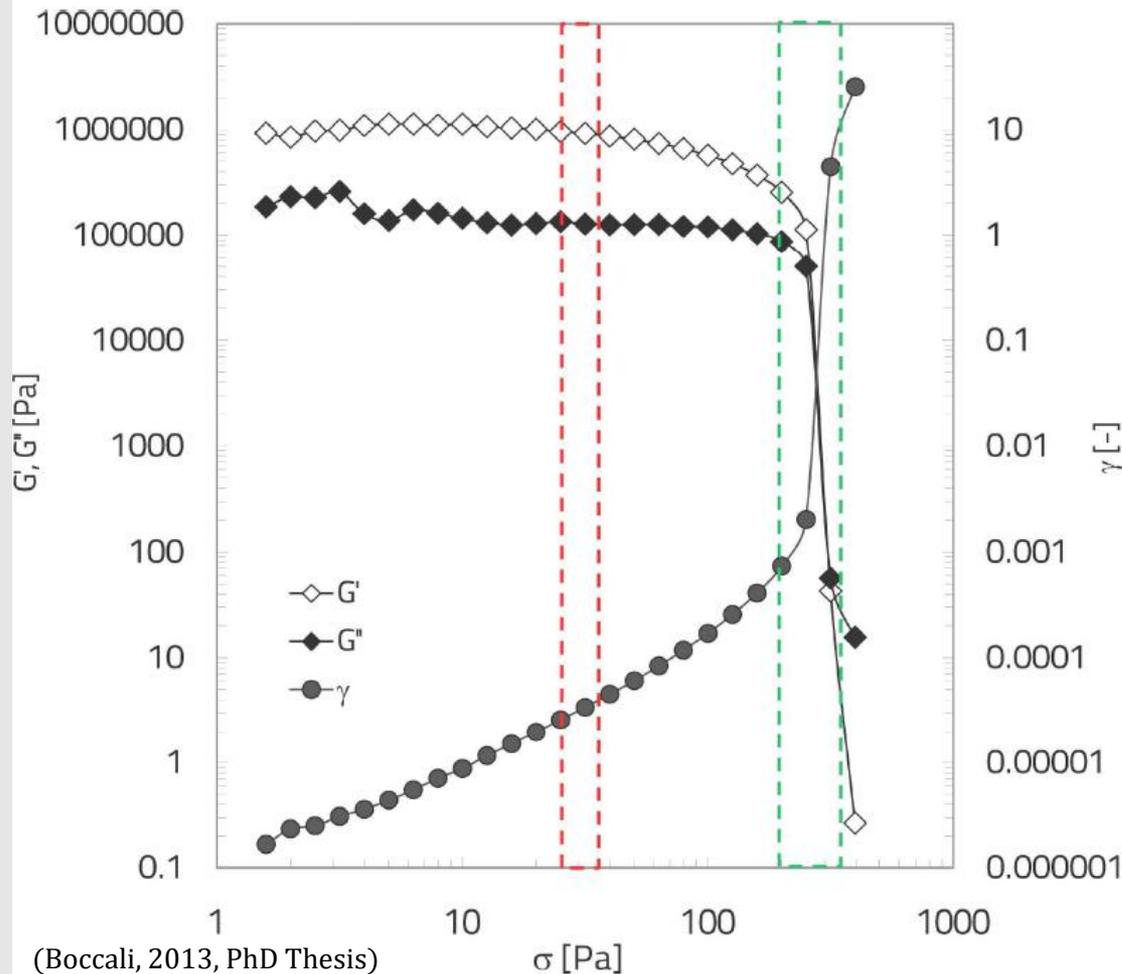
**Stepwise test:** la prova consiste in una sequenza di segmenti consecutivi a sforzo costante con valori crescenti in modalità logaritmica da 1 a 1000 Pa. Durante ogni gradino lo sforzo è mantenuto costante per un tempo prefissato (60 o 90 secondi) oppure interrotto prima se la velocità di deformazione raggiunge un valore costante (stato stazionario).

# Tecniche analitiche

**Ramp test:** lo sforzo viene incrementato con continuità secondo una progressione geometrica da 1 a 17500 Pa in un tempo prefissato (450, 600 o 900 secondi) e si misura la deformazione via via accumulata. Nel caso di sistemi plastici come quelli in esame, inizialmente la deformazione aumenta linearmente nei modi propri di un corpo solido elastico, a sforzi maggiori il comportamento diventa non lineare e, quando si supera un valore critico (yield stress), la deformazione cresce in maniera molto marcata con derivata crescente e si instaura un flusso continuo fino alla rottura del campione compreso nello dispositivo di misura (Nguyen et al., 2006).

**Oscillatory stress sweep test:** lo sforzo oscillatorio applicato ha frequenza costante (1 Hz) e ampiezza crescente secondo una progressione geometrica. Anche in questo caso, come nei ramp test, si rileva la transizione di comportamento dal campo lineare a quello fortemente non lineare, essendo però le grandezze misurate non più la viscosità ma i moduli  $G'$  e  $G''$ , che rappresentano, rispettivamente, la componente elastica (storage modulus) e quella viscosa (loss modulus) della risposta del sistema.

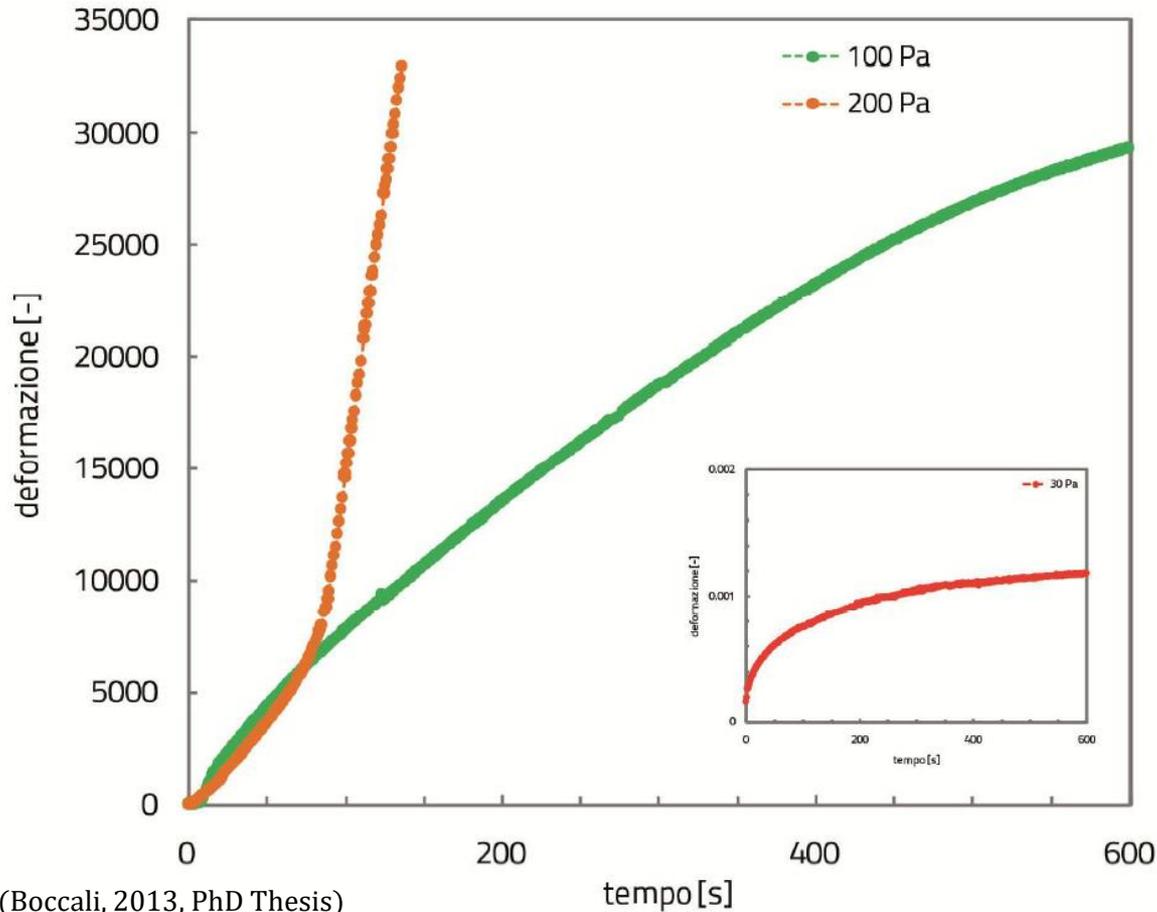
# Stress sweep test



I test in regime oscillatorio Mettono in evidenza il comportamento viscoelastico del materiale e il suo cambiamento in funzione dell'incremento di sforzo. In particolare rilevano la transizione da una risposta lineare ad una non lineare e il brusco passaggio ad un flusso viscoso. La **componente elastica ( $G'$ )** è tipicamente predominante nel campo lineare mentre, a sforzi elevati, decresce più rapidamente della **componente viscosa ( $G''$ )**, crollando definitivamente nella regione di flusso.

Nel rettangolo rosso è evidenziato il passaggio da un comportamento viscoelastico lineare ad uno non lineare. Nel rettangolo verde è evidenziato l'inizio del flusso, con il superamento dell'yield stress.

# Creep test

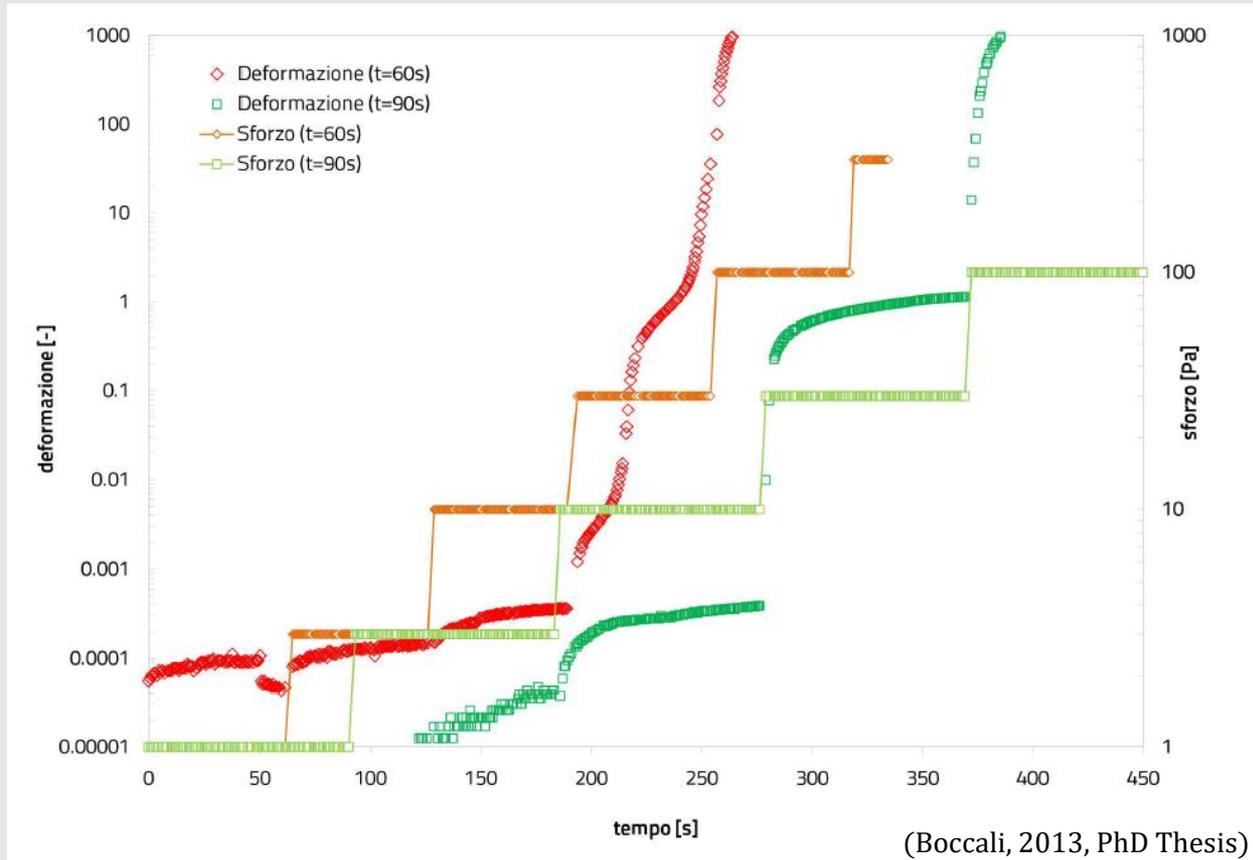


Il comportamento evidenziato è il medesimo.

A sforzi relativamente bassi (30 Pa) il fluido subisce deformazioni basse, di diversi ordini di grandezza inferiori all'unità.

Il cambiamento di curvatura della curva deformazione-tempo, passando da uno sforzo pari a 100 Pa ad uno pari a 200 Pa, segna l'effettivo passaggio ad una condizione di flusso. Ciò significa che il valore di *yield stress* è compreso nel *range* tra 100 e 200 Pascal.

# Stepwise test

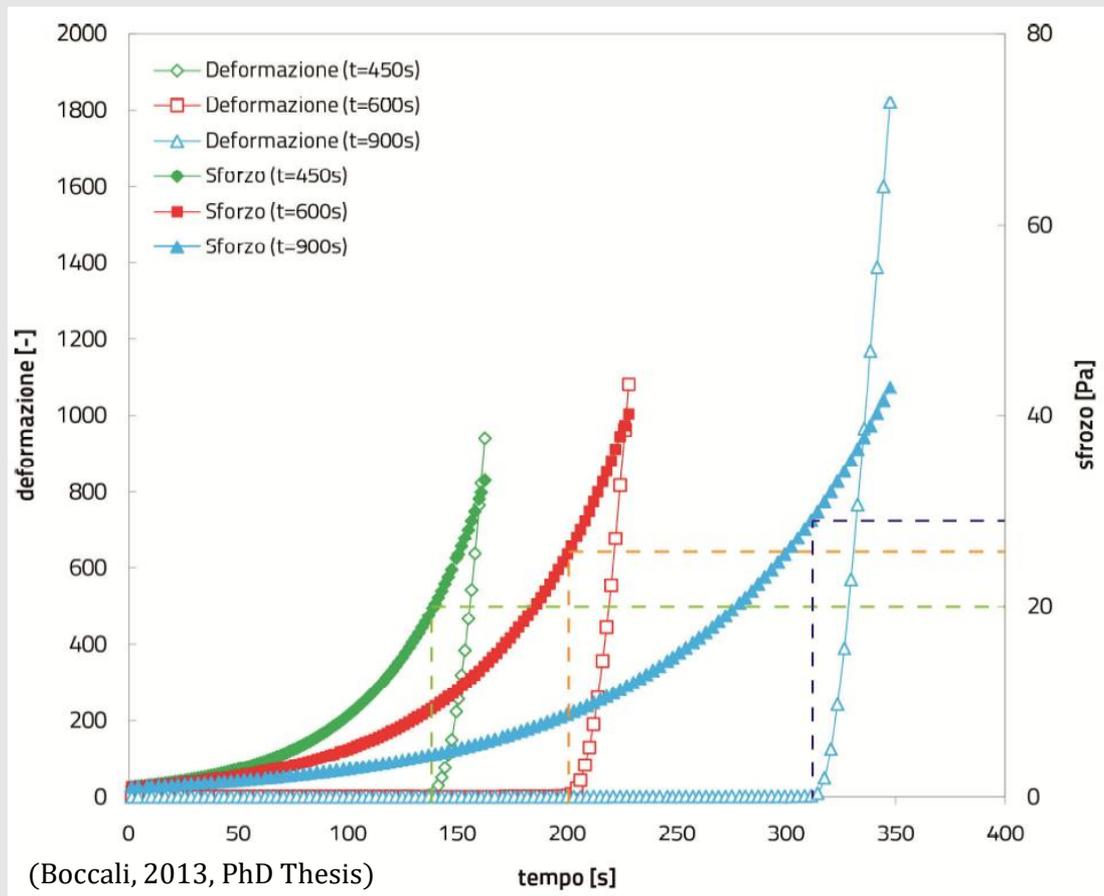


L'esecuzione delle prove a gradini (stepwise test) ha evidenziato come la risposta del campione sia funzione dello sforzo applicato e del tempo di applicazione dello stesso. Più a lungo dura la prova, in particolare ciascun gradino a sforzo costante, più il campione resiste al flusso.

Per un tempo di gradino pari a 60 secondi il flusso ha inizio sotto l'azione di uno sforzo pari a 30 Pa, mentre serve uno sforzo pari a 100 Pa se il tempo di prova è di 90 secondi.

Tali effetti temporali possono essere ascritti alla progressiva evaporazione dell'acqua dalla superficie del campione e al conseguente indurimento dello stesso. La deformazione, durante il flusso, non aumenta in maniera continua ma subisce alcune flessioni dovuto ad un'irregolare distribuzione della deformazione all'interno del campione.

# Ramp test



L'immagine evidenzia i ramp test, eseguiti a 450, 600 e 900 secondi. I risultati appaiono influenzati dal tempo di prova e quindi dal tempo di residenza del campione nel dispositivo di misura, ma l'effetto sul valore di *yield stress* risulta ridotto rispetto ai test a gradini.

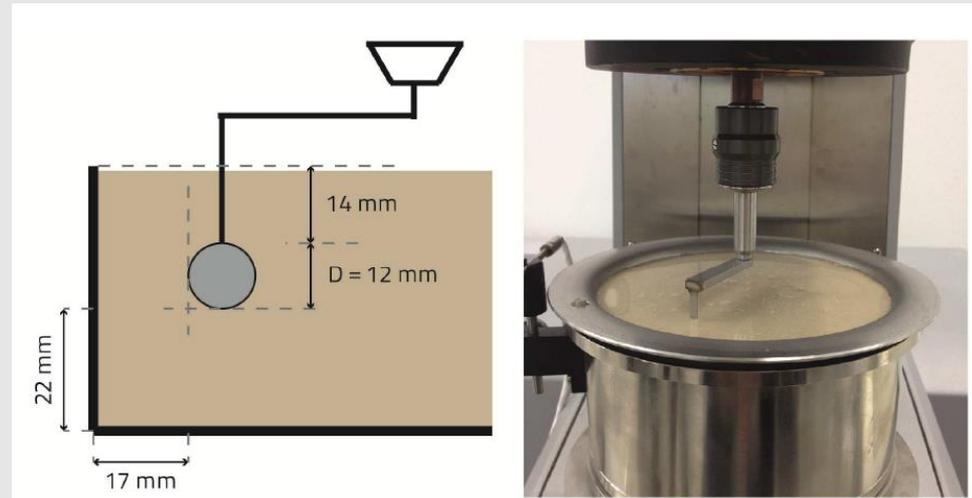
Le linee tratteggiate indicano che i valori del limite di scorrimento, derivati in prima approssimazione per via grafica, rientrano in un intervallo tra 20 e 30 Pa, *range* non eccessivamente ampio se confrontato con quanto si ricava da altre metodologie analitiche.

# Criticità dei risultati

Da un punto di vista teorico, se un flusso di particelle è sottoposto a taglio possono occorrere i seguenti effetti indesiderati: *wall slip* e *segregazione* (sedimentazione e/o migrazione delle particelle). Se si verificano questi effetti, la curva di flusso potrebbe non rappresentare correttamente le proprietà reologiche del fluido analizzato (Schatzmann, 2005).

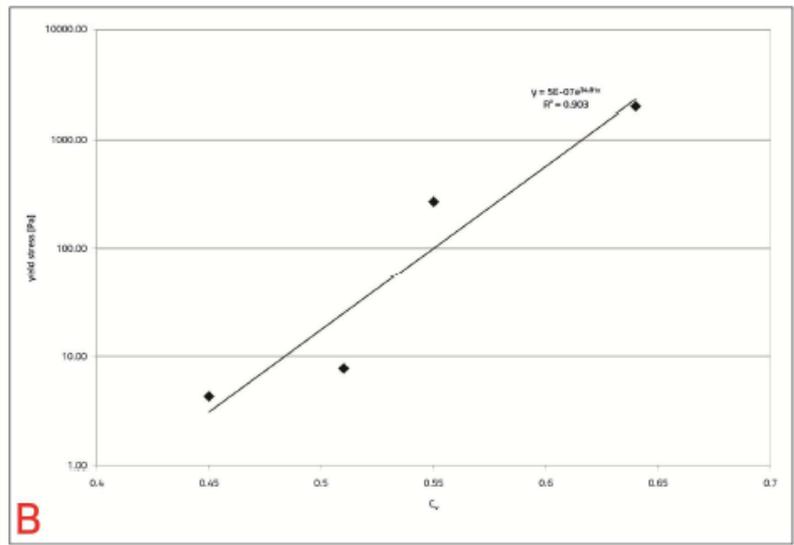
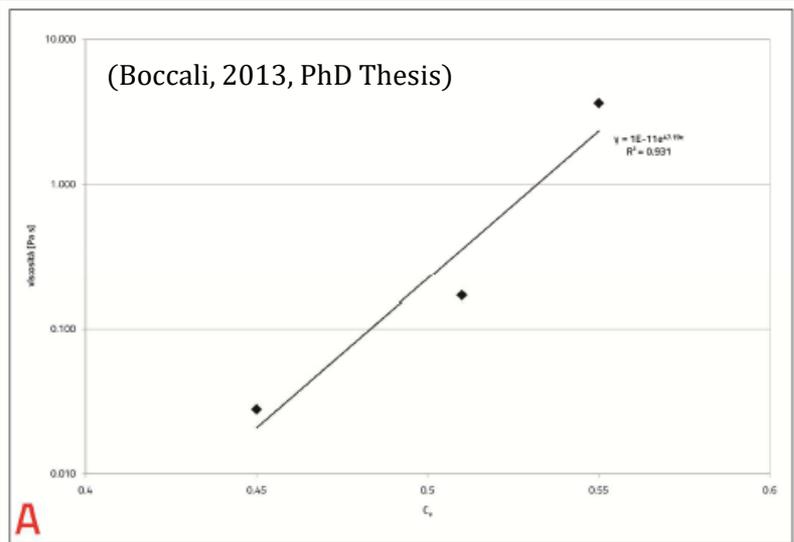
Può essere utile, per ridurre l'effetto di wall slip, utilizzare, per le analisi reologiche, dei piatti zigrinati.

Al contrario, risulta più complicato comprendere e ridurre gli effetti di sedimentazione e migrazione delle particelle, che dipendono da numerosi fattori quali la concentrazione del sedimento, la distribuzione granulometrica, il tipo e la forma dei grani, la velocità di deformazione e il tipo di reometro utilizzato per le analisi. Esistono dei limiti dimensionali per le particelle di una sospensione che debba essere studiata con strumenti reometrici come quelli considerati, se si vuol prevenire effetti significativi di sedimentazione.



Reometro BMS

# A cosa servono i parametri reologici?



Il software FLO-2D, prevede di inserire i dati relativi ai parametri reologici sotto forma di coefficienti  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\delta$ . In tal modo il software può man mano calcolare i valori reologici al variare della concentrazione volumetrica.

Dalla letteratura scientifica vengono fornite numerose coppie di coefficienti reologici, derivate da studi specifici e tarate con simulazioni nei bacini per cui sono state calcolate.

O'Brien (2003) sottolinea che ogni conoide alluvionale, area o regione investigata ha condizioni geologiche e pedologiche specifiche. E' necessario quindi, per una miglior caratterizzazione di ciascun bacino, eseguire analisi reologiche su campioni locali e da essi derivare i parametri reologici tipici del bacino in questione.

Curve di regressione esponenziale dell'yield stress e della viscosità per il rio Cucco.

# A cosa servono i parametri reologici?

FONTE	$\eta$		$\tau_y$	
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\delta$
Aspen Pit 1	0.036	22.1	0.181	25.7
Aspen Pit 2	0.0538	14.5	2.72	10.4
Aspen Natural Soil	0.00136	28.4	0.152	18.7
Aspen Mine Fill	0.128	12.0	0.0473	21.1
Aspen Watershed	0.000495	27.1	0.0383	19.6
Aspen Mine Source Area	0.000201	33.1	0.291	14.3
Glenwood 1	0.00283	23.0	0.0345	20.1
Glenwood 2	0.0648	6.2	0.0765	16.9
Glenwood 3	0.00632	19.9	0.000707	29.8
Glenwood 4	0.000602	33.1	0.00172	29.5
Dai et al., 1980	0.0075	14.39	2.6	17.48
Tecca et al., 2006	0.0075	14.39	0.152	18.7
Sosio et al., 2007	0.00203	18.0	0.04	22.0

Coefficienti reologici utilizzati per la back analysis; le prime 10 righe sono ricavate da O'Brien & Julien (1988).

(Boccali, 2013, PhD Thesis)

PROVA		SR1	SR2
BINGHAM	$\tau_y$	<b>0.59</b>	<b>0.53</b>
	$\tau_{inf}$	<b>0.12</b>	<b>0.26</b>
RBC	$\tau_{cr}$	0.37	0.33
	$m$	4.24	4.67
	$\eta_0$	347.74	303.92
	$\tau_y$	<b>0.58</b>	<b>0.61</b>
	$n$	12.33	12.75

Valori di yield stress e viscosità ricavati per due prove a rampa sul campione SOL8 ( $C_v = 0.41$ ).

# ZONIZZAZIONE

# STRUMENTI PER LA ZONIZZAZIONE

**1) MAPPATURA SULLA BASE DI INDICATORI DI CAMPO** (a scala regionale e di bacino)

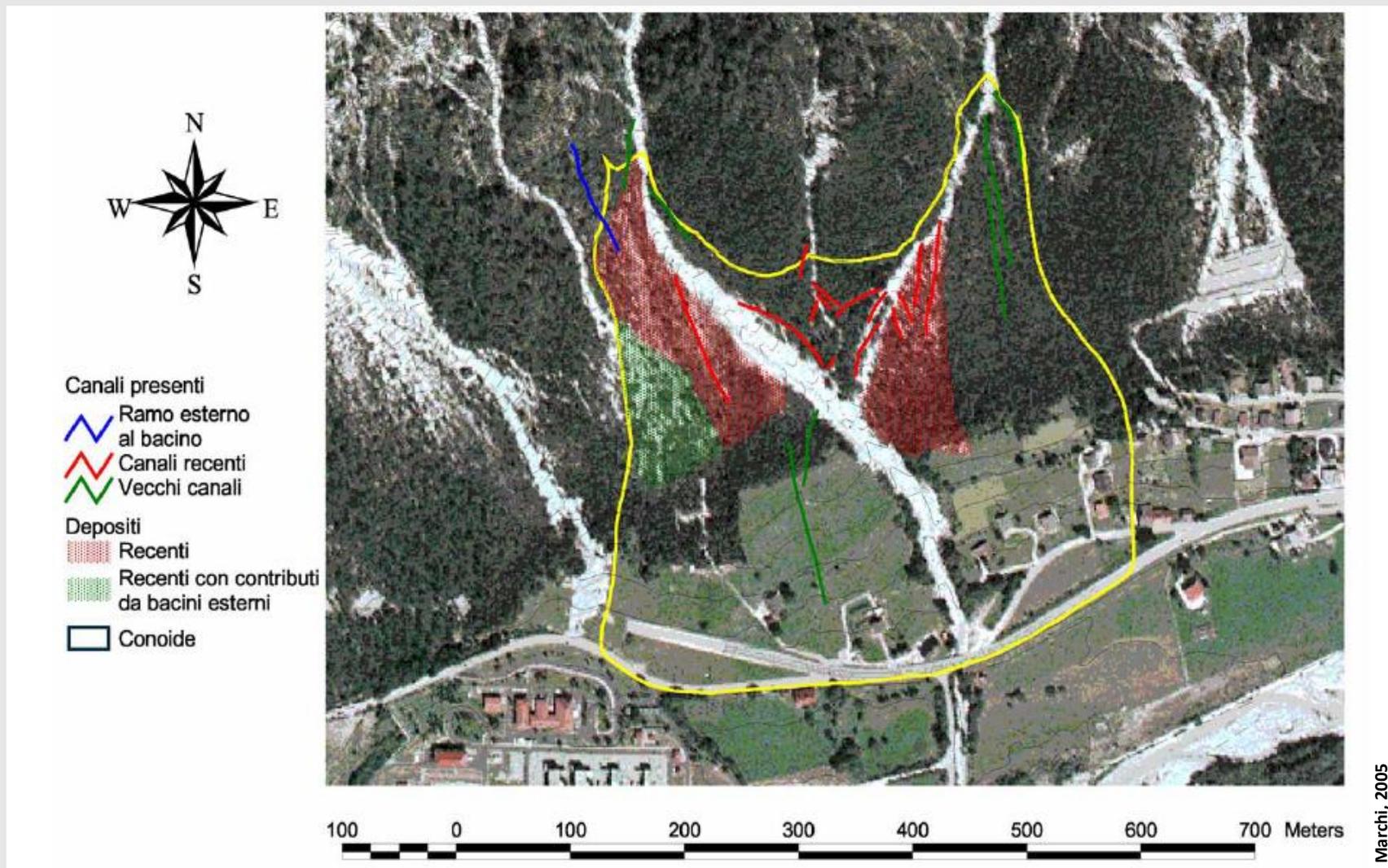
Vale la teoria: “ *dove si sono verificate colate nel passato queste si ripeteranno “ e dove sono giunte le colate nel passato, ritorneranno”*

Gli indicatori di campo possono essere dati dalle forme deposizionali, solitamente ancora facilmente riconoscibili in aree non urbanizzate.

**2) METODI EMPIRICI** (a scala di bacino)

**3) UTILIZZO DI MODELLI DI CALCOLO** (mono-dimensionali e bi-dimensionali) a scala di bacino

# 1) MAPPATURA SULLA BASE DI INDICATORI DI CAMPO



Bacino del Rio Cucco (Malborghetto Valbruna)

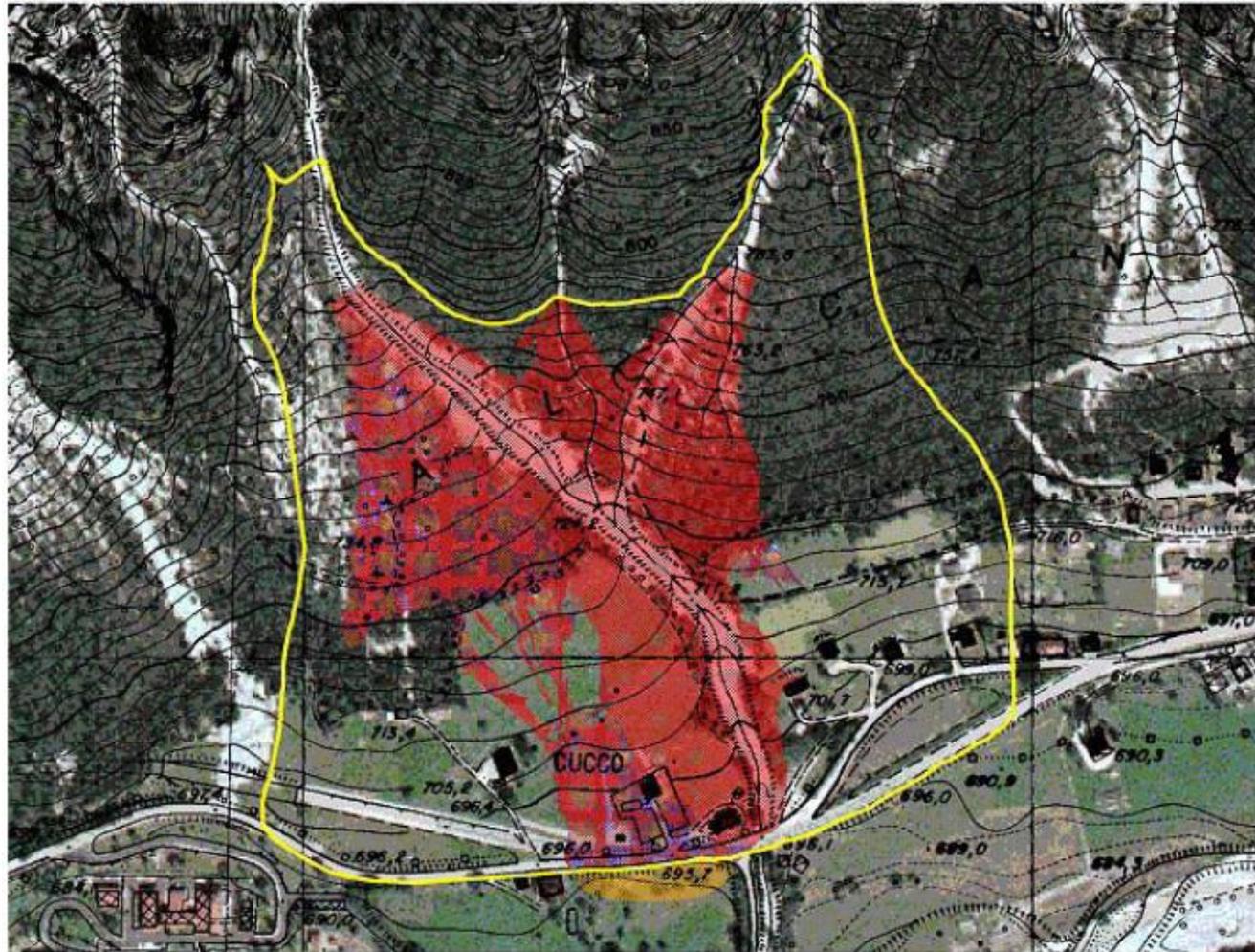
Studio effettuato prima dell'alluvione del 29 agosto 2003.

# 1) MAPPATURA SULLA BASE DI INDICATORI DI CAMPO

Mappatura finale  
post-evento



-  Acqua e sedimento fine
-  Deposito di colata detritica



100 0 100 200 300 400 Meters

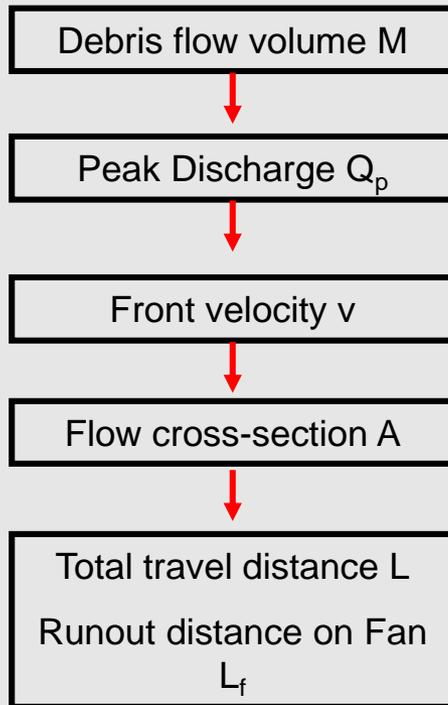
Marchi, 2005

Bacino del Rio Cucco (Malborghetto Valbruna) - Espansione della colata detritica del 29 agosto 2003

## 2) METODI EMPIRICI: IL VOLUME

È possibile valutare aree di espansione delle colate di detrito tramite metodi di tipo empirico.

La definizione delle zone interessate da colate detritiche può essere fatta in funzione delle caratteristiche del fenomeno (**VOLUME**) e della topografia dell'area di studio. Sulla base di formule empiriche vengono definiti parametri quantitativi.



METODOLOGIA	NOTE
Utilizzo di dati storici	Analisi probabilistica di serie storiche
Equazioni empiriche e semiempiriche	Vengono solitamente definite su base statistica. Possono essere utilizzate per avere una stima del volume mobilizzabile.
Metodi geomorfologici	Prevedono rilevamento in campagna e la definizione del potenziale volume. Possono essere soggettivi

## 2) METODI EMPIRICI: I DATI STORICI

L'utilizzo della documentazione storica può dare informazioni utili sulla tipologia dei processi, sulla frequenza dei processi di maggior intensità e in alcuni casi su dati quantitativi riguardo l'entità del processo. In particolar modo dove presenti i dati storici sono utili per l'individuazione di relazione tra volumi detritici trasportati e la frequenza degli eventi. Queste relazioni possono essere indagate a scala regionale o a scala di singolo bacino.

### **Fonte dati:**

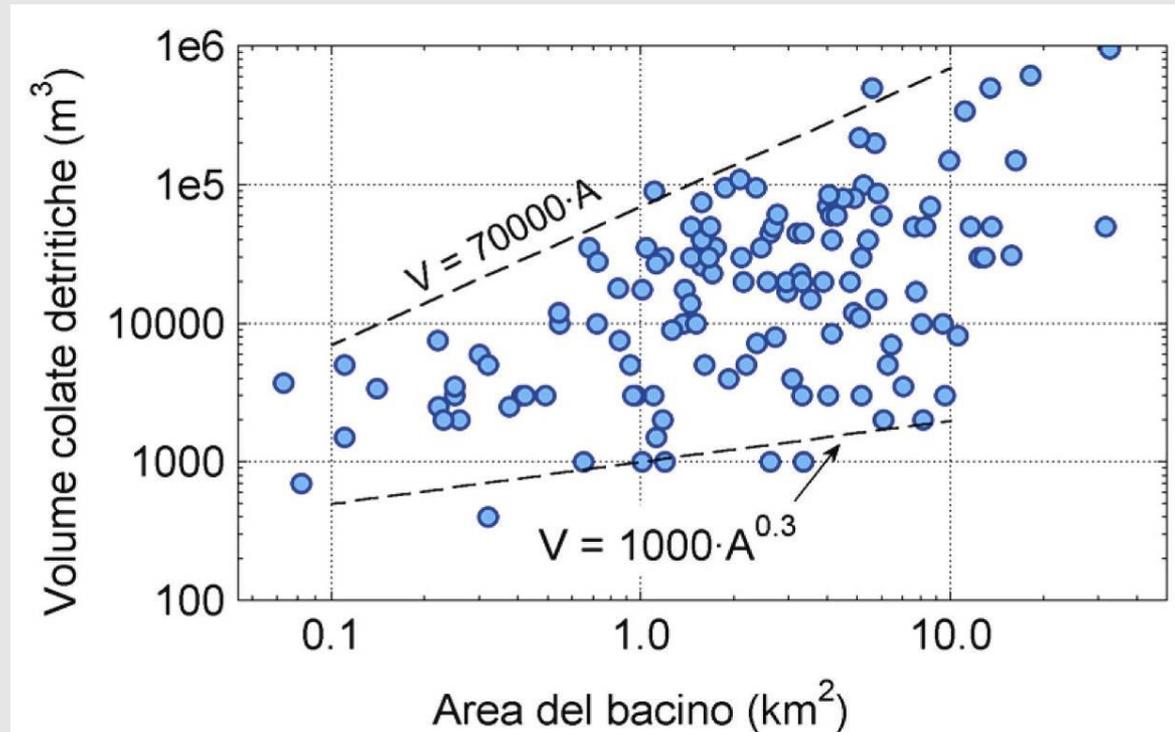
Monografie pubblicate,  
archivi comunali,  
relazioni tecniche, pubblicazioni.

### **Vantaggi:**

- Stime basate su dati raccolti nel bacino oggetto di studio
- Valutazioni di volumi corrispondenti a determinati tempi di ritorno

### **Limitazioni:**

- Serie storiche raramente disponibili e di modesta numerosità



Definizione di linee di inviluppo empiriche.

Nel grafico sono riportati i valori massimi per ogni bacino. Tali linee servono per avere una stima del volume mobilizzabile in un bacino data la sua area.

## 2) METODI EMPIRICI: FORMULE SEMI-EMPIRICHE

In letteratura sono presenti *numerose espressioni che calcolano i volumi delle colate detritiche a partire da variabili in grado di esprimere sinteticamente l'influenza delle caratteristiche fisiche del bacino sull'entità dei fenomeni.*

Fra le **variabili utilizzate** come predittori in queste formule si hanno:

- Parametri morfometrici del bacino e del conoide alluvionale
- Indici espressivi delle condizioni geolitologiche e della copertura vegetale.

Metodi utilizzati per lo sviluppo delle formule:

Metodi di natura statistica

Metodi riconducibili alla taratura di un modello concettuale

**Vantaggi:**

- Facilità e rapidità di applicazione

**Limiti:**

- **Grossolana approssimazione dei risultati:** i parametri utilizzati non riescono a comprendere la complessità dei processi, i dati impiegati per lo sviluppo delle espressioni sono approssimati.

## 2) METODI EMPIRICI: FORMULE SEMI-EMPIRICHE

### FATTORE DI TORRENZIALITA' K

Esprime sinteticamente l'influenza che l'assetto geomorfologico del bacino, la presenza di dissesti e la disponibilità di sedimento hanno sui volumi detritici mobilizzabili in occasione di eventi estremi.

Il fattore di torrenzialità viene determinato sulla base dell'area del bacino (A) e di due parametri a e b i cui valori sono determinati per le diverse regioni del territorio austriaco.

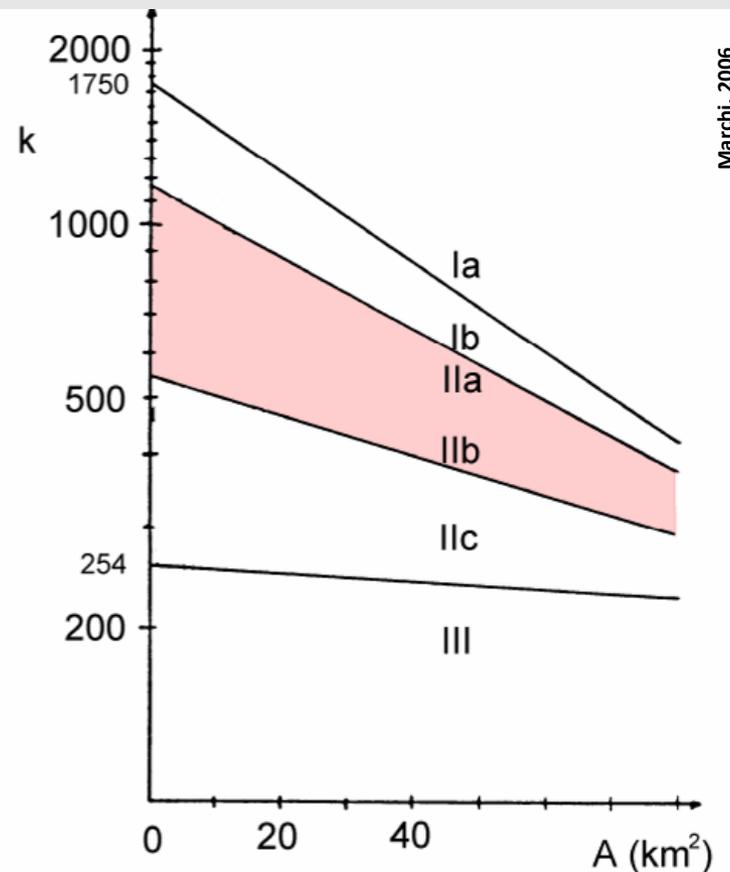
Determinazione del fattore di torrenzialità  $k$  (Kronfellner-Kraus)

$$K = a / e^{b \cdot A}$$

A area del bacino (km<sup>2</sup>)  
a, b parametri regionali (Austria)

	a	b
Ia	1750	0.018
Ib, IIa	1150	0.014
IIb	540	0.008
III	254	0.0016

D'Agostino et al. (1996),  
Trentino Occidentale:  
a: 667; b: 0.005



## 2) METODI EMPIRICI: FORMULE SEMI-EMPIRICHE

### INDICE GEOLITOLOGICO (I.G.)

Viene calcolato tramite una media ponderata dell'estensione degli affioramenti delle rocce appartenenti a diverse classi litologiche con dei punteggi che esprimono la propensione dei vari litotipi alla produzione di sedimento.

CLASSE LITOLOGICA	PUNTEGGIO I.G.
Copertura quaternaria	5
Filladi	4
Rocce terrigene	3
Rocce laviche degradate, tufi basaltici	2
Rocce calcaree	1
Rocce porfiriche, granitiche, dioritiche	0

D'Agostino et al.,1996.

I punteggi possono essere cambiati in funzione delle condizioni di fratturazione e alterazioni locali.

## 2) METODI EMPIRICI: METODI GEOMORFOLOGICI

Con questo termine vengono indicate le **procedure che pervengono alla determinazione dei volumi delle colate detritiche sulla base di rilievi delle aree sorgenti di sedimento.**

La valutazione dei potenziali apporti di detrito riguarda alvei torrentizi, sponde instabili o in erosione e frane connesse alla rete idrografica.

Metodologie proposte:

- **Hungr et al. (1984)**
- **Spreafico (1999)**

Tali metodi prevedono l'individuazione delle aree sorgenti di sedimento lungo la rete idrografica e quindi la stima dei volumi per unità di lunghezza del collettore.

### **Vantaggi:**

- flessibilità con cui è possibile procedere alla determinazione dei volumi
- non richiedono dati su eventi avvenuti in passato, quindi sono sempre applicabili

### **Limiti:**

- soggettività nella valutazione dei volumi, che riguarda soprattutto la stima degli spessori erodibili.

## 2) METODI EMPIRICI: METODI GEOMORFOLOGICI

### HUNGR (1984)

La rete idrografica del bacino studiato viene suddivisa in tratti omogenei, per quanto riguarda le **caratteristiche di erodibilità**. Ad ogni tratto omogeneo viene attribuito un tasso di erosione unitario (**apporto detritico unitario del canale  $e_i$** ) che indica il volume erodibile per unità di lunghezza del collettore. I valori di  $e_i$  vengono quindi moltiplicati per le lunghezze dei vari tratti.

Il volume complessivo mobilizzabile è quindi dato dalla somma dei contributi dei vari tratti considerati.

$$V = \sum_{i=1}^n L_i \cdot e_i$$

Dove:

$n$  è il numero di tratti considerati

$L_i$  è la lunghezza espressa in metri del tratto omogeneo

Il metodo è applicabile in bacini di superficie approssimativamente compresa tra 1 e 3 Km<sup>2</sup>

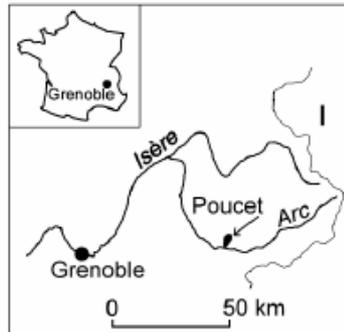
Classe	Pendenza alveo (°)	Materiale alveo	Sponde	Condizioni di stabilità	Apporto detritico unitario (m <sup>3</sup> m <sup>-1</sup> )
A	20 - 35	Roccia	Non erodibili	Stabile (virtuale assenza di detrito)	0 - 5
B	10 - 20	Sottile strato di detrito o suolo sciolto su roccia	Non erodibili (roccia)	Stabile	5 - 10
C	10 - 20	Copertura detritica o morena	Altezza < 5 m	Stabile	10 - 15
D	10 - 20	Copertura detritica o morena	Detrito, altezza > 5 m	Angolo di riposo del materiale	15 - 30
E	10 - 20	Copertura detritica o morena	Detrito, altezza > 20 m	Sponde potenzialmente instabili (area in frana)	Fino a 200 (sorgente di detrito localizzata)

Valori indicativi dell'apporto detritico unitario (da Hungr et al., 1984).

Questi valori proposti per la British Columbia appaiono validi anche per regioni a clima umido per le medie latitudini.

## Esempio: T. Poucet, Alpi Francesi

- Riconoscimento di tratti di canale omogenei
- Determinazione della lunghezza
- Assegnazione di un valore dell'apporto di sedimento unitario



### Extrait de la légende

- 1 n° d'une section de lit (cf. tableau 8)
- ▲▲▲▲ Dépôts torrentiels récents
- Berges
- TTTTT hauteur < 1 m
  - TTTTTT hauteur 1-5 m
  - ■ ■ ■ hauteur 5-10 m
  - hauteur > 10m

N° bief	Type de chenal	Apport unitaire de sédiment $e_i$ (m <sup>3</sup> /m)	Volume de sédiments V (m <sup>3</sup> )
1	C	10	2 500
2	C	10	10 500
3	C	10	1 250
4	C	10	5 000
5	C	10	5 000
6	D	15	1 275
7	D	30	4 500
8	D	15	1 500
9	D	15	10 800
10	E	260	26 000
11	E	50	25 000
12	C	10	3 000
13	D	15	2 550
14	D	15	1 725
15	C	10	1 850
16	D	15	4 500
Volume total:			106 950

(Brochot et al., 2002)

## 2) METODI EMPIRICI: METODI GEOMORFOLOGICI

### SPREAFICO et al. (1999)

Anche questo metodo propone l'esecuzione di rilievi geomorfologici lungo la rete idrografica per la quantificazione del volume di materiale solido mobilizzabile.

Rispetto al metodo di Hungr et al. (1984) che indica dei valori degli apporti detritici unitari comprensivi del contributo di alveo e sponde, **il metodo di Spreafico prevede una quantificazione separata tra alveo e sponde.**

Sorgenti di sedimento localizzate e di particolare rilevanza, quali frane che interessano le sponde, devono essere oggetto di apposite valutazioni di dettaglio.

**Il volume mobilizzabile per l'intero bacino è dato dalla somma dei contributi stimati per i diversi tratti in cui è stato suddiviso l'alveo e per le sorgenti di sedimento su sponde e versanti.**

## Volume erodibile da un tratto di alveo torrentizio:

$$V_{c,i} = k_1 \cdot L_i \cdot b_i \cdot d_i$$

dove:

$L_i$ : lunghezza del tratto d'alveo (m)

$b_i$ : larghezza media del tratto del canale (m)

$d_i$ : profondità media di erosione (m)

$k_1$ : coefficiente di riduzione adimensionale

## Volume erodibile dalle sponde:

$$V_{s,i} = k_2 \cdot L_{s_i} \cdot h_{s_i} \cdot d_{s_i}$$

dove:

$L_{s_i}$ : lunghezza del tratto di sponda (m)

$h_{s_i}$ : altezza della sponda (m)

$d_{s_i}$ : profondità media di erosione (m)

$k_2$ : coefficiente di riduzione adimensionale

# Volume erodibile sorgente localizzata

$$V_{p,i} = k_3 \cdot \frac{Lp_i \cdot hp_i}{2} \cdot dp_i$$

dove:

$Lp_i$ : lunghezza del tratto di sponda (m)

$hs_i$ : altezza sorgente (m)

$ds_i$ : profondità media di erosione (m)

$k_2$ : coefficiente di riduzione  
adimensionale



La sorgente localizzata viene assimilata in questo caso ad un triangolo.

Volume erodibile dall'alveo:  
 indicazioni per la stima del  
 coefficiente di riduzione k  
 (da Spreafico et al., 1999).

OBJET	Facteurs de réduction $k_{lit}$ pour le processus de transport	
	Charriage	Lave torrentielle
Lit partiellement rocheux	$\frac{L_{GA} - L_F}{L_{GA}}$	$\frac{L_{GA} - L_F}{L_{GA}}$
Blocs > $d_{90}$	$\frac{L_{GA} - L_B}{L_{GA}}$	1
Très gros blocs 1)	$\frac{L_{GA} - L_{BL}}{L_{GA}}$	$\frac{L_{GA} - L_{BL}}{L_{GA}}$
Seuils en bois, bon état	0.3 - 0.5	0.8 - 1 <sup>2)</sup>
Seuils en bois, état défectueux 2)	0.8 - 1	1
Seuils en pierres, bon état	0.3 - 0.5	0.5 - 0.8
Seuils en pierres, état défectueux	0.5 - 0.8	0.8 - 1
Seuils en béton	0.3 - 0.5	0.5 - 0.8 <sup>3)</sup>
Danger d'obstruction	0.6 - 0.8	1

1) par ex. provenant de processus de versants (matériel d'éboulement)

2) considérer rupture du seuil

3) considérer rupture de certains seuils, mais pas de toute la série

$L_{GA}$  = Longueur du tronçon du cours d'eau  
 $L_F$  = Longueur du tronçon rocheux  
 $L_B$  = Longueur du tronçon avec blocs >  $d_{90}$   
 $L_{BL}$  = Longueur du tronçon avec de très gros blocs  
 (par ex. matériel d'éboulement)

**Nella scelta del valore è importante tenere in considerazione i vari fattori che possono influire sul tasso di erosione.**

**Fattori che influiscono sull'erosione:**

- spessore della copertura detritica
- pendenza dell'area sorgente di sedimento
- granulometria
- coesione
- presenza di copertura vegetale
- capacità erosiva della corrente

**Valori di erosione delle sponde:**

frequenti i valori tra 0.5 - 1 m fino a 2 m per aree localizzate instabili.