# Caratterizzazione reologica e modellazione numerica di un Debris flow in ambiente alpino

# Rosanna Sosio<sup>1</sup>, Giovanni Battista Crosta<sup>2</sup>, Paolo Frattini<sup>3</sup>, Elena Valbuzzi<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Università degli Studi di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie, rosanna.sosio@unimib.it
<sup>2</sup>Università degli Studi di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie, giovannibattista.crosta@unimib.it
<sup>3</sup>Università degli Studi di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie, paolo.frattini@unimib.it
<sup>4</sup>Università degli Studi di Milano Bicocca, Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie, paolo.frattini@unimib.it

# Rheological behaviour and numerical modelling of a Debris flow event

ABSTRACT: Debris flows are common processes and represent a severe natural hazard in mountainous regions. In this study we investigate the evolution and the dynamic of a debris flow event occurred in the Rossiga valley (Lombardia, Italian Central Alps). The event was triggered by a rapid regressive landslide with high water content by two weeks of continuous precipitation on November 2002. The debris flow was characterized by a total volume of up to 90000 m<sup>3</sup>. Field evidences revealed a maximum flow depth of 7 - 8 m, with an estimated peak discharge of 350 - 400 m<sup>3</sup>/s. Grain size distribution and rheological behaviour of the involved material were characterized by laboratory analyses.We used a two-dimensional routing model, assuming a Bingham behaviour for the debris flow, to replicate the event and to reconstruct the depositional areas. The computations were developed on a 5\*5 m and 10\*10 m grid obtained by resampling the LIDAR DEM 1 meter in resolution. The model calibration was performed with respect to the coefficients that define the viscosity and the yield stress dependency on sediment concentration at fixed bulked volume and boundary conditions. The aim of the calibration was to gain the best fit on observed event volume, debris flows runout distance, maximum flow depths and peak discharge. The sensitivity of the model to different routing conditions was tested by varying several critical input data.Comparing the results of the numerical model and laboratory tests we characterized the debris flow predominant behaviour as viscous with relevant frictional effects, at least at the flow snout.

*Key terms: Debris flows, rheology, numerical modelling Termini chiave: colata detritica, reologia, modellazione numerica* 

#### Riassunto

I debris flows generati da frane superficiali sono processi frequenti in ambiente alpino e costituiscono un'importante fonte di pericolo. In questo lavoro viene presentato lo studio di un evento di debris flow innescato da una frana regressiva a rapida evoluzione avvenuta in Val Rossiga (Valsassina, Lombardia), nel novembre del 2002.

Le analisi reometriche di laboratorio eseguite sulla frazione di granulometria di dimensioni inferiori alla sabbia fine indicano un comportamento di tipo pseudoplastico con yield strength. La colata detritica è stata riprodotta numericamente utilizzando il codice di calcolo Flo-2D ed imponendo i parametri reologici (viscosità e yield strength) ottenuti dalle analisi di laboratorio. In simulazioni successive, gli stessi parametri reologici sono stati ricavati tramite back analisi al variare di alcune condizioni di simulazione.

Dal confronto dei risultati ottenuti si conferma la possibilità di caratterizzare il comportamento viscoso del flusso tramite analisi reometriche. Tuttavia, la sola componente coesiva ottenuta dalle prove di laboratorio non è in grado di spiegare la yield strength del materiale ed il suo utilizzo nel modello numerico si traduce nella sovrastima dell'area di esondazione. Tale discordanza è stata attribuita all'effetto, non trascurabile, della componente di resistenza frizionale dovuta alla frazione grossolana, non inclusa nelle prove di laboratorio.

# 1. Introduzione

I debris flows sono movimenti in massa il cui comportamento reologico è il risultato delle interazioni che si realizzano tra le frazioni solida e fluida che costituiscono la miscela (Iverson, 1997). Il volume e la composizione della miscela sono i principali fattori che concorrono a determinare la pericolosità associata a tali fenomeni, dal momento che da questi dipende la mobilità e l'energia di impatto della colata (Iverson et al., 1998; Hungr, 2000; Jakob, 2005).

Oggetto di questo studio è un debris flow avvenuto in Val Rossiga (Valsassina, Lombardia, fig. 1), a seguito di un prolungato evento meteorico che ha coinvolto le Alpi Centrali nel novembre del 2002. Tale evento è stato caratterizzato da due settimane di precipitazioni continue e mediamente intense, con picchi giornalieri superiori ai 170 mm. Il livello di precipitazione cumulata sull'intera durata dell'evento è pari a 600-700 mm di pioggia, per aree in cui le precipitazioni medie annue sono nell'ordine di 1500-1600 mm. L'incremento nella pressione dei pori nella copertura detritica, conseguente all'infiltrazione dell'acqua di precipitazione, ha provocato lo scivolamento della stessa copertura lungo il basamento cristallino, risultando nel movimento regressivo di una massa satura d'acqua (Crosta et al., in stampa).

La colata detritica si è evoluta come diretta conseguenza della frana di scivolamento ed ha mobilizzato un volume stimato in 90000 m<sup>3</sup> circa. La propagazione è avvenuta lungo un alveo già interessato da fenomeni di scivolamento verificatisi nei giorni precedenti. Il canale presenta una pendenza media del 18%. La velocità è stata valutata dai massimi livelli di flusso lungo il canale sulla base della relazione proposta da Jhonson e Rodine (1984) in 8-10 m/s. La colata si è evoluta in un'ondata principale, nel tratto in bacino il flusso ha raggiunto una profondità di 7-8 m e una portata di picco di 350 - 400 m<sup>3</sup>/s. Buona parte del materiale si è deposto in apice della conoide, con spessori massimi di 3-3,5 m. La durata dell'evento è stata valutata, sulla base delle testimonianze raccolte, in circa 7 minuti.



Figura 1. Area di studio in cui sono indicate le aree sorgenti dei principali movimenti franosi del novembre 2002. La colata detritica si è sviluppata a partire dal movimento franoso # 4.

Topography of the study area showing the source areas of the landslides of the November 2002 event. The main landslide (# 4) transformed into a  $80,000 - 90,000 \text{ m}^3$  debris flow. The debris flow deposition (shadow area) largely took place at the fan apex and at the confluence with the main river.

### 2. Analisi di laboratorio

Il materiale mobilizzato è scarsamente selezionato: sono presenti blocchi di dimensioni anche superiori ai 5 m di diametro immersi in abbondante matrice fine. Il materiale è stato caratterizzato dal punto di vista granulometrico e del comportamento reologico. Le analisi granulometriche sono state effettuate su campioni prelevati nell'area sorgente, di transito e di deposizione ed hanno interessato la frazione al passante di 20 mm, corrispondente al 30 - 40% del totale. Tali analisi evidenziano una percentuale di argilla e limo variabile tra il 2 ed il 12%.

Abbiamo valutato il comportamento reologico di uno dei campioni di materiale depositato in conoide. Le analisi sono state eseguite sulla frazione al passante di 0.425 mm (contenuto in argilla e limo del 5%) applicando al reometro Paar Physica MCR 300 il sistema a sfera rotante (Ball Measuring System -BMS-). Tale sistema di misura è costituito da un contenitore cilindrico di 57.5 mm raggio e 48 mm di altezza, capace di un volume di 0.5 L, in cui viene trascinata una sfera di 12 mm di diametro. L'idoneità del BMS allo studio delle sospensioni naturali è stata valutata da lavori precedenti confrontando i risultati con quelli ottenuti utilizzando configurazioni geometriche tradizionali (Schatzmann et al., 2003).

Al variare della concentrazione della frazione solida, entro un range di variazione di 45% - 63% in volume, sono stati ricavati: (1) la viscosità Binghamiana a partire dalle curve di flusso (O'Brien e Julien, 1988; Major e Pierson, 1992); (2) la yield strength dalle curve di creep (Barnes, 1999). Le analisi hanno evidenziato un comportamento viscoplastico e dipendente dal tasso di deformazione applicato (fig 2). I valori di sforzo ottenuti al variare del tasso di deformazione si discostano al massimo del 15% rispetto al valore medio. Per tassi di deformazione inferiori a 5 s<sup>-1</sup> il materiale presenta un comportamento pseudoplastico ascrivibile al modello di Hershel-Bulkley in cui il valore dell'esponente, *n*, varia tra 0.5 e 0.7:

$$\tau = \tau_v + \kappa \dot{\gamma}^h \tag{1}$$

nell'equazione  $\tau e \tau_v$  rappresentano rispettivamente lo sforzo di taglio ed il valore di resistenza critica (yield strength) che deve essere superata per avere flusso,  $\dot{\gamma}$  rappresenta il tasso di deformazione di taglio, mentre k ed n rappresentano, rispettivamente, l'indice di consistenza e di pseudoplasticità. Per valori superiori a 5 s<sup>-1</sup> il materiale tende ad assumere un comportamento di tipo Binghamiano  $(n=1 \text{ e } k=\eta_{\text{P}})$ . Al variare della concentrazione della frazione solida le proprietà reologiche variano in modo esponenziale (O'Brien & Julien, 1988; Major & Pierson, 1992; Coussot and Piau, 1994):

$$\eta_{\rho} = \alpha e^{\beta C_{\nu}} \tag{2}$$

$$\tau_{\nu} = \gamma \mathbf{e}^{\delta C_{\nu}} \tag{3}$$

Per le concentrazioni analizzate sono stati ottenuti valori di yield strength variabili tra 3.5 Pa e 400 Pa e di viscosità Binghamiana tra 0.3 Pa s a 14 Pa s.

#### 3. Modellazione numerica

La modellazione è stata eseguita utilizzando il codice di calcolo Flo 2D (O'Brien et al., 1993).



Figura 2. Distribuzione granulometrica dei campioni prelevati nella zona sorgente (Fig. 1) e nell'area di transito e deposizione (campioni 1 e 2).

Grain size distribution of the deposit (sample 1 and 2) and source area material.

Il codice propaga l'idrogramma di piena su fondo rigido assumendo che il materiale sia omogeneo e monofase e presenti un comportamento Bingahmiano.

La componente resistiva è data dalla somma dei termini di yield strength, viscosità e turbolenza.

$$\tau = \tau_{v} + \eta \dot{\gamma} + C \dot{\gamma}^{2} \tag{4}$$

dove il termine quadratico definisce la componente turbolenta-inerziale ed il coefficiente C è dipendente dal coefficiente di Manning. I valori di viscosità e di yield strength assunti nel modello variano con la concentrazione secondo le relazioni 2 e 3.

L'idrogramma di piena è stato propagato su una griglia a 10 m ottenuta ricampionando il LIDAR DEM ricostruito successivamente all'evento con una risoluzione di 1 m. L'onda di colata in entrata è stata riprodotta a partire dalla differenza tra i profili precedente e successivo all'evento, avendo scalato il massimo spessore sulla portata di picco e la proiezione in pianta dell'area sorgente sulla durata dell'evento (Fig. 3). Alle portate liquide sono stati associati valori di concentrazione solida variabili e superiori al 20%. Il valore massimo, pari al 55% in volume, precede il picco delle portate liquide (Scenario A).

Le evidenze di terreno (massimi spessori di flusso, area di deposizione, etc.) hanno guidato la scelta dei coefficienti empirici legano i parametri reologici che alla concentrazione volumetrica solida (eq. 2 e 3). Gli stessi coefficienti sono stati ricalibrati in diverse condizioni di simulazione: l'idrogramma è stato propagato su una griglia a 5 m di lato (Scenario B), la concentrazione solida è stata incrementata del 10% su tutto l'idrogramma di piena (Scenario C). Un quarto scenario (Scenario L) replica l'evento avendo implementato i coefficienti relativi ai parametri reologici ottenuti dalle analisi di laboratorio nelle condizioni di modellazione dello scenario A (dimensione della griglia 10\*10 m, massima concentrazione volumetrica solida di 55%).



Figura 3. Risultati delle analisi reologiche. (a) curve di flusso, (b) risultati delle prove di creep in cui sono indicate, per ogni concentrazioni solide in volume, al di sopra di un valore critico di sforzo si passa da un comportamento di tipo elastico ad un comportamento viscoso

(a) Viscosity curves derived for different solid concentrations in volume,  $C_{v}$ . (b) Transient response at varying the applied stress. For each sediment concentrations two tests are shown: in the former the induced strain attains a constant value, in the second the strain increases through a constant rate. Such a transition occurs at stress corresponding to the yield strength

#### 4. Risultati e discussione

Le aree di esondazione ottenute per i differenti scenari sono illustrate in figura 4. I risultati degli scenari A e B sono in buon accordo con le evidenze di terreno. Aumentando il limite superiore della concentrazione solida dell'onda di colata (Scenario C) non è stato possibile ottenere dei parametri in grado di riprodurre correttamente la deposizione del materiale: imponendo l'estensione dell'area, gli spessori di flusso sovrastimano mediamente del 15% quelli osservati. Imponendo i parametri reologici ottenuti in laboratorio, la colata è più mobile. Lo scenario L sovrastima l'area di esondazione del 25%, mentre gli spessori di flusso risultano inferiori a quelli osservati.



Figura 4. Idrogramma in entrata. Nello scenario C il valore delle concentrazioni solide in volume sono stati incrementati in modo costante del 10%.

Inflow hydrographs routed by the numerical model. At varying bulking concentrations the total discharge was kept constant.

I valori dei coefficienti dei parametri reologici ottenuti dalla modellazione numerica e dalle analisi in laboratorio differiscono tra loro in misura variabile (Tab. 1). Tali differenze derivano principalmente dalle modalità in cui i parametri sono ottenuti, e riflettono le incertezze relative ad entrambi i metodi utilizzati. I risultati delle analisi reometriche risentono delle piccole dimensioni del campione e del limite superiore della frazione granulometrica investigata. I parametri ottenuti hanno validità relativamente alle specifiche condizioni di misura nelle quali sono stati effettuate le misure e possono non tenere conto di tutti gli effetti di interazione che si realizzano nelle condizioni naturali. Le prove reometriche sono state effettuate su un singolo campione del quale si è considerata la sola frazione granulometrica al passante dei 0.425 mm. In questo intervallo granulometrico il comportamento reologico del flusso è controllato principalmente dalle interazioni colloidali delle frazioni più fini (Coussot, 1997).

All'opposto, i parametri reologici ottenuti tramite back analisi riassumono la complessità del comportamento della colata e, in aggiunta alle proprietà intrinseche del materiale, la loro calibrazione risente in una qualche misura degli effetti di tutti i fattori di controllo del flusso imposti o non considerati nel modello. Ne risulta che i parametri reologici dipendono in misura variabile dalle condizioni di modellazione imposte, sia in riferimento agli elementi al contorno (ricostruzione della topografia dell'area e della geometria del canale, attribuzione dei coefficienti di Manning, etc.), sia per quanto riguarda la riproduzione della dinamica dell'evento di colata (andamento dell'idrogramma di piena e delle concentrazioni solide, etc.).

Tabella 1. Coefficienti che descrivono la relazione tra i parametri reologici e la concentrazione volumetrica solida, ottenuti per i diversi scenari (A, B, C) e dalle analisi di laboratorio (Scenario L). *Coefficients taking into account the viscosity and yield strength exponential relation with the sediment concentration. The back calculated values (Scenarios A, B, C), are compared with the result of the laboratory analysis (Scenario L).* 

	Viscosità [Pa s]		Yield strength [Pa]	
	α	β	γ	δ
Scenario A	2.83 *10 <sup>-04</sup>	19	1.30 *10 <sup>-02</sup>	23
Scenario B	1.83 *10 <sup>-04</sup>	19	9.30 *10 <sup>-03</sup>	23.5
Scenario C	2.83 *10 <sup>-04</sup>	18.2	1.10 *10 <sup>-02</sup>	21.8
Scenario L	2.97 *10 <sup>-04</sup>	18.8	1.27 *10 <sup>-03</sup>	22.8

Il confronto dei coefficienti ottenuti dai diversi scenari per descrivere l'andamento dei parametri reologici con la concentrazione solida mostra un buon accordo relativamente alla viscosità, mentre per quanto riguarda la vield strength le differenze sono maggiori (fig. 5). In entrambi i casi l'andamento delle curve è analogo (i valori dei coefficienti  $\beta$  e  $\gamma$  sono paragonabili), ad indicare una simile dipendenza dei parametri reologici al contenuto d'acqua per tutti gli scenari. Diminuendo le dimensioni delle celle (scenario B) sono richiesti valori del coefficiente di Manning superiori, al fine di mantenere il flusso in condizione subcritica. Perché la rispondenza con le evidenze di terreno sia rispettata, l'incremento del coefficiente di Manning richiede una la diminuzione della viscosità e l'incremento della yield strength, per compensare l'abbassamento delle velocità in canale e degli spessori di flusso in conoide.

I dati di laboratorio sottostimano la vield strength e da questo dipende l'impossibilità di replicare correttamente il processo, soprattutto alle basse velocità di flusso in fase di deposizione. L'impossibilità di determinare in modo adeguato la vield strength è stato attribuito al fatto di aver escluso dalle analisi reometriche le frazioni a granulometria superiore a 0.425 mm. La yield strength che ne risulta deriva prevalentemente dalla resistenza coesiva dovuta alle frazioni più fini, mentre sono esclusi gli effetti frizionali dovuti al materiale più grossolano. Il contributo alla resistenza del flusso dovuto alla resistenza frizionale può essere rilevante se si considera la tipologia di materiale mobilizzato, come già osservato anche da altri autori per miscele che presentano distribuzioni granulometriche a componente prevalentemente sabbiosa (Iverson and LaHusen, 1993; Pearson et al. 2001). I bassi valori di velocità escludono che il contributo dovuto alle interazioni inerziali sia significativa.



Figure 5. Aree e spessori di esondazione per i differenti scenari Observed (a) and computed flow depth curves for the different scenarios (b, c, d)



Figura 6. Andamenti delle relazioni esponenziali che descrivono la dipendenza dei parametri reologici con la concentrazione volumetrica solida

Trends of the viscosity and yield strength with sediment concentration, obtained through back analyses at varying routing conditions. The laboratory derived relationships are reported. The lower and upper values for the rheological parameters obtained by varying the routing conditions bound the shadowed area. The viscosity values obtained by the rheological analysis (a) fall into the range of uncertainties of the model while the yield strength values (b) are one order magnitude lower than the back calculated ones

# 5. Ringraziamenti

all'interpretazione delle analisi reologiche.

I risultati della modellazione numerica hanno beneficiato del contributo di J.S. O'Brien. G. Mojoli ha fornito supporto

Barnes, H.A.. 1999. The yield stress – a review or ' $\pi\alpha\nu\tau\alpha$  pet' – everything flows? Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics 81, 133-178.

Coussot, P., Piau, J.M., 1994. On the behaviour of fine mud suspensions. Rheologica Acta 33, 175-184.

Coussot, P., 1997. Mudflow Rheology and Dynamics. IAHR monograph, Balkema, Rotterdam, 260 pp..

Crosta, G.B., Chen, J., Frattini, P., in stampa. Forecasting hazard scenarios and implications for the evaluation of countermeasure efficiency for large debris avalanches. Engineering geology.

Hungr, O., 2000. Analysis of debris flow surges using the theory of uniformly progressive flow. Earth Surface Processes and Landforms 25, 483-495. Iverson, R.M., LaHusen, R.G., 1993. Friction in debris flows: Inferences from large-scale flume experiments. In ASCE Natural Conference on Hydraulic Engineering, Shen H.W., Su S.T., Wen F. (eds) American Society of Civil Engineers: San Francisco, 1604-1609.

Iverson, R.M., 1997. The physics of debris flows. Review of Geophysics 35, 245-296.

Iverson, R.M., Schilling, S.P., Vallance, J.W., 1998. Objective delineation of lahar-inundation hazard zones. Geological Society of America Bulletin 110, 972-984.

Jakob, M., 2005. A size classification for debris flows. Engineering Geology 79, 151-161.

Johnson, A.M., Rodine, J.D., 1984. Debris flow. In Slope Instability, Brunsden D., Prior D.B. (eds). Wiley: Chichester, 257-361.

Major, J.J., Pierson, T.C., 1992. Debris flow

rheology: experimental analysis of fine-grained slurries. Water Resources Research 28, 841-857.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., Fullerton, W.T., 1993. Two dimensional water flood and mudflow simulation. Journal of Hydraulic engineering 119, 244-259.

O'Brien, J.S., Julien, P.Y., 1988. Laboratory analysis of mudflow properties. Journal of Hydraulic Engineering 110, 877-887.

Parsons, J.D., Whipple, K.X., Simoni, A., 2001. Experimental Study of the Grain-Flow, Fluid-Mud Transition in Debris Flows. Journal of Geology 109, 427-447.

Schatzmann, M., Fischer, P., Bezzola, G.R., 2003. Rheological Behaviour of Fine and Large Particle Suspensions. Journal of Hydraulic Engineering 129, 796-803.