

ANALISI DINAMICA DI COLATE DETRITICHE NEL BACINO DI TERRIA (APPENNINO UMBRO, CENTRO ITALIA)

Diana Salciarini & Pietro Conversini

Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale - Università degli Studi di Perugia
e-mail: diana@unipg.it

RIASSUNTO: Salciarini D. & Conversini P.: *Analisi dinamica di colate detritiche nel bacino di Terria (Appennino Umbro, centro Italia)*. IT ISSN 0394-3356, 2008).

In questo articolo viene presentato lo studio condotto a seguito di due eventi di colata detritica avvenuti nel Giugno e nell'Agosto del 2005 in un piccolo bacino idrografico situato in Umbria orientale, nel centro Italia. Le precipitazioni derivanti da brevi ed intensi temporali di natura convettiva sono state la causa principale di questi dissesti idrogeologici, che si sono propagati per oltre 2 km lungo la rete di drenaggio. In questo articolo, dopo aver brevemente illustrato le analisi topografiche e idrologiche alla base dello studio, mostriamo l'applicazione del modello numerico FLO-2D per simulare la fase di propagazione e deposizione degli eventi di colata. Il modello è in grado di simulare il flusso di volume mobilitato e le aree di espansione della colata. Anche se concettuale, il modello può essere usato per ottenere informazioni per progettare misure di mitigazione del rischio come, ad esempio, opere trasversali in alveo per il controllo dell'erosione ed il rallentamento della velocità di propagazione. In particolare, il lavoro qui presentato mostra una procedura di analisi articolata in due fasi: la prima contiene la fase di acquisizione ed elaborazione dati e le analisi condotte simulando le condizioni originali del bacino prima degli eventi; la seconda contiene le analisi condotte simulando le condizioni modificate dopo la realizzazione delle opere di mitigazione previste.

ABSTRACT: Salciarini D. & Conversini P.: *Dynamic analysis of debris flows in the Terria watershed, (Umbria Apennines, central Italy)*. IT ISSN 0394-3356, 2008).

The paper presents the study of two debris flow events occurred in June and August 2005 in a small watershed located in the eastern Umbria region of central Italy. Brief, intense convective storm precipitations were the main cause for these processes that flowed for more than 2 km along the drainage network. In this paper, after introducing the topographical and hydrological analyses, we present the application of a commercial numerical model to simulate the propagation and the depositional phase of the events. The model is able to simulate the mobilized volume flow and the expansion areas. Although conceptual, the model has implications for the design and effectiveness of various mitigation measures, as check dams for the flow speed reduction and erosion control. In particular, this paper presents a procedure constituted of two phases: in the first one, we describe the data collection and elaboration, and the analyses simulating the original condition of the basin before the events occurrences. In the second phase we describe the results obtained from the simulations considering the modified conditions after the countermeasures installations.

Parole Chiave: colate detritiche, pericolosità, conoidi alluvionali.

Keywords: debris flow, hazard, alluvial fans.

1. INTRODUZIONE

Le colate detritiche sono fenomeni caratterizzati da una notevole azione distruttrice lungo il loro percorso e generalmente manifestano segnali premonitori scarsi o nulli (ad es.: TAKAHASHI, 1981; ARMANINI, 1999; CROZIER & GLADE, 2005). In Umbria, tali eventi si registrano principalmente nell'area sud-orientale, dove la concomitanza di coperture detritiche ed elevate pendenze dei versanti costituisce la condizione predisponente per il loro innesco, che si verifica in occasione di piogge particolarmente intense o prolungate (GUZZETTI & CARDINALI, 1991; CONVERSINI *et al.*, 2005; SALCIARINI *et al.*, 2006a). Nell'ultimo decennio, uno dei casi di maggior interesse si è verificato nell'estate 2005 (30 Giugno e 31 Agosto) lungo l'alveo del Fosso di Terria, nel Comune di Ferentillo (Provincia di Terni) (Figura 1). I volumi depositati nella fase di arresto hanno provocato l'interruzione della viabilità locale di accesso al nucleo storico dell'abitato omonimo, danneggiando il ponte ed ostruendo il canale di deflusso sottostante.

La previsione dei possibili volumi solidi che le colate detritiche possono depositare in un conoide è

una problematica di grande importanza nella scelta delle misure da adottare per la gestione del rischio. A questo scopo possono essere di grande utilità dei modelli teorici che, applicati secondo un preciso schema di lavoro, possono fornire risultati importanti per la modellazione della fase pre e post intervento. In quanto segue, si vuole presentare lo studio condotto a seguito degli eventi di colata detritica appena introdotti.

2. INQUADRAMENTO DELL'AREA DI STUDIO: COLATE DETRITICHE NEL BACINO DEL FOSSO DI TERRIA

Il bacino idrografico in esame è situato nella catena Appenninica centrale (Figura 2), nella zona della Valnerina.

L'intera zona è caratterizzata da una morfologia collinare con valli strette e versanti acclivi. Il bedrock affiorante è costituito da una sequenza di calcari con frazione marnosa più pronunciata nella parte alta della sequenza (formazioni della Serie Umbro-Marchigiana) (CALAMITA & DEIANA, 1986; GUZZETTI & CARDINALI, 1991;

CONVERSINI *et al.*, 2005; Salciarini *et al.*, 2006a). Inoltre è presente una percentuale di territorio in cui affiora una copertura colluviale, con spessori diversi, essenzialmente in funzione dell'acclività dello strato coesivo sottostante (SALCIARINI *et al.*, 2006b). La configurazione climatica dell'Appennino centrale deriva dall'interazione tra le caratteristiche morfologiche della catena montuosa e le caratteristiche dei percorsi atmosferici locali. Il clima è tipico della zona Appennino - Mediterranea, con estati secche e inverni miti, con due picchi stagionali di pioggia: uno in tardo autunno (novembre) ed uno in primavera (aprile) (CORRADINI & MELONE, 1988; SALCIARINI *et al.*, 2006b).

Il primo evento importante di colata detritica lungo il Fosso di Terria di cui si ha memoria risale al 1965. La colata detritica attraversò il centro abitato ed arrivò fino al sottostante Fiume Nera (circa 2 km a valle), ostruendolo parzialmente. Recentemente sono avvenuti due eventi nel bacino di Terria, ripetuti a distanza di circa due mesi. Il primo si è verificato il 30 giugno 2005, a seguito di un temporale molto intenso e concentrato in un'area molto ristretta. La pioggia è iniziata nel tardo pomeriggio e, dopo due ore, si è innescata la prima onda di colata che ha investito la strada comunale che porta al paese, ostruendo un ponte di attraversamento e interrompendo la circolazione. Il secondo evento si è verificato la sera del 31 agosto, a seguito di un temporale altrettanto violento ma di durata leggermente inferiore (circa 1 ora e mezzo). In Figura 3 è riportata una planimetria del bacino con l'individuazione delle aree significative per la descrizione del fenomeno.

In entrambi i casi, i danni principali hanno riguardato la strada provinciale che porta al centro abitato, che è stata completamente invasa dai sedimenti, restando così impraticabile per alcuni giorni (Figura 4a e 4b). Inoltre, particolarmente evidente è apparso il canale di erosione scavato dalla colata, in alcuni punti profondo anche fino a 3 metri (Figura 5).

2.1 Interpretazione qualitativa dei fenomeni avvenuti lungo il Fosso di Terria nell'estate 2005

A seguito dei due eventi di colata detritica avvenuti nell'estate 2005 lungo l'alveo del Fosso di Terria, sono stati realizzati rilievi in campagna ed analisi di laboratorio per fornire una caratterizzazione qualitativa dei fenomeni.

Entrambi gli eventi di colata si sono innescati a seguito dell'apporto idrico proveniente da violenti temporali estivi. Le elevate pendenze dei versanti laterali al fosso di Terria (oltre 45° per circa il 60% dell'invaso) hanno conferito a questi pendii un comportamento quasi impermeabile, permettendo solo ad una modesta frazione di pioggia di infiltrarsi effettivamente. La frazione preponderante è andata invece a costituire un ruscellamento superficiale che si è rapidamente riversa-



Fig. 1 - Panorama dopo la colata di detrito verificatasi nel Giugno 2005.

Landscape after the debris flow occurrence, in June 2005.



Fig. 2 - Localizzazione dell'area di studio.

Localization of the study area.

verso l'alveo del fosso di Terria, dove si è accumulata un'onda di piena in grado di prendere in carico volumi di materiale anche notevoli.

Dai sopralluoghi effettuati e dall'analisi degli eventi avvenuti, è apparso evidente che nel bacino del fosso di Terria le colate detritiche sono alimentate dagli apporti detritici che convergono nell'alveo del fosso stesso dai versanti laterali precedentemente all'innescò

Fig. 3 - Bacino di studio con individuazione delle aree sorgenti di detrito, canale di erosione e deposito della colata.

Study watershed with localization of debris source areas, erosion channel and final deposit.

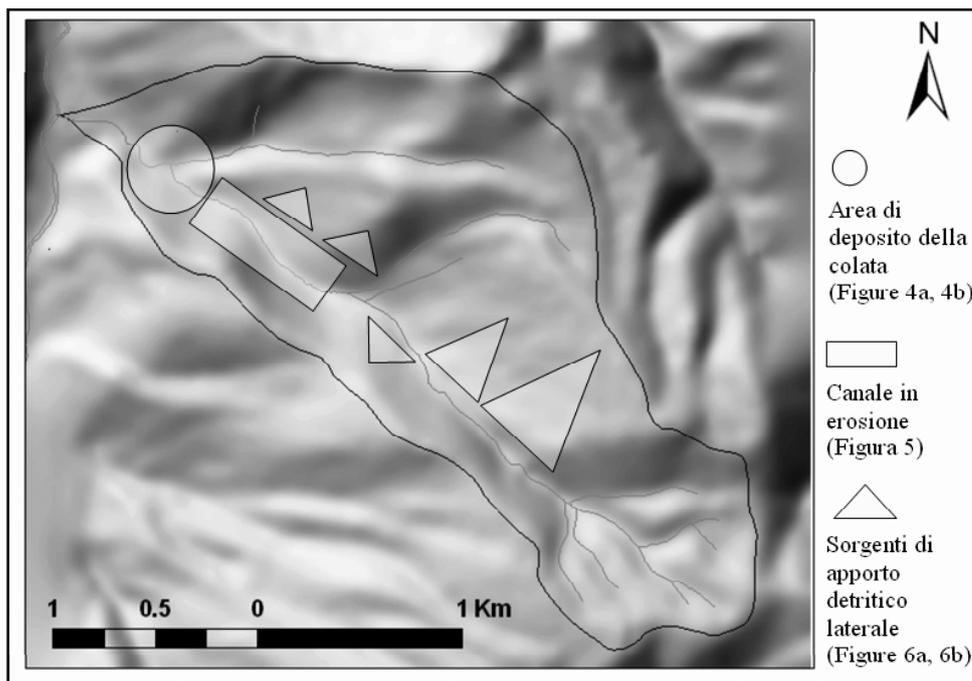


Fig. 4 a) deposito finale del fronte della colata, si può osservare che gli alberi sono stati ricoperti per tutta l'altezza del fusto; b) parte di deposito che ha oltrepassato la strada.

a) final deposit of the front of the debris flow, notice that trees were partially covered by the sediments; b) portion of deposit that passed the local road.

e qui si depositano (Figure 6a e 6b). Le pendenze del fosso (inferiori ai 13°) non sono sufficienti a generare condizioni critiche in condizioni ordinarie; durante la maggior parte dell'anno, infatti, il fosso di Terria non è interessato da deflusso idrico superficiale, se non in modo estremamente limitato; questo può invece verificarsi successivamente ad eventi pluviometrici particolarmente rilevanti.

In definitiva, la mobilitazione di colate detritiche, cioè il meccanismo che ha determinato il passaggio da massa solida a materiale fluido che è sceso lungo la convergenza topografica rappresentata dal fosso di Terria, sembra essere stata dominata da un processo di flusso superficiale che ha incorporato progressivamente materiale solido e aumentato la concentrazione. La comparsa di ruscellamento superficiale, e soprattutto di ondate improvvise ha determinato delle rotture localizzate nei tratti più pendenti lungo il letto del canale, che durante il resto dell'anno risultano stabili poiché le pen-



Fig. 5 - Canale di erosione prodotto dalla colata detritica nel Fosso di Terria.

Erosion channel produced by the debris flow.

denze sono limitate. Le masse in movimento si sono poi arrestate in modo naturale in corrispondenza delle locali diminuzioni di pendenza, creando lobi di accumulo sia lungo il canale stesso, che, soprattutto, in corrispondenza della strada di accesso al centro abitato.

3. CARATTERISTICHE E FUNZIONAMENTO DEL MODELLO FLO-2D

La simulazione numerica di colate detritiche presenta notevoli difficoltà a causa della complessità del fenomeno fisico e, conseguentemente, delle equazioni necessarie per descriverlo. Per questo motivo, i dati provenienti da rilievi e misure eseguiti in sito risultano estremamente importanti sia per quanto attiene agli aspetti teorici del problema (determinazione del comportamento reologico), sia per quelli più strettamente "pratici" (predisposizione delle misure di contenimento o prevenzione, definizione di sistemi di allarme etc..).

Nella maggior parte dei casi, i codici numerici che simulano il comportamento di una colata detritica considerano la miscela liquido-solido come se fosse un fluido omogeneo equivalente, il cui comportamento è descritto da un'assegnata formulazione reologica. In generale i parametri di input per tali modelli sono costituiti da:

- la topografia della zona in esame;
- l'idrogramma della colata;
- i parametri reologici della massa instabile.

In particolare, l'analisi idrologica di dettaglio e la scelta di una reologia appropriata sono di fondamentale importanza. La calibrazione di questi parametri può essere condotta attraverso una procedura di back analysis sugli eventi conosciuti.

Allo scopo di valutare le condizioni di rischio dell'area in esame è stato applicato il modello numerico FLO-2D (O'BRIEN 2002). Il codice di calcolo FLO-2D è un modello bidimensionale, sviluppato da J. S. O'Brien e aggiornato nel 2006, distribuito da FLO-2D Software Inc. È un modello che può essere usato sia per la simulazione di eventi di piena che per specifiche applicazioni nell'ambito della modellazione delle colate. FLO-2D fa parte dei modelli idraulici approvati dalla U.S. - FEMA (U.S. Federal Emergency Management Agency) per questo tipo di studi. Questo codice di calcolo permette di simulare, in moto vario, la propagazione e la deposizione dell'idrogramma liquido-solido di una colata.

La progressione dell'idrogramma liquido-solido avviene su un sistema di elementi quadrati di una griglia a maglia fissa. Il metodo di calcolo è basato sull'integrazione numerica alle differenze finite delle equazioni di continuità e di conservazione della quantità di moto. Il comportamento del materiale viene descritto da un modello reologico quadratico, che combina le componenti di resistenza dovute a taglio, viscosità, collisioni e turbolenza in funzione della concentrazione del sedimento; in esso al termine viscoplastico del modello di "fluido alla Bingham", viene aggiunto un termine turbolento dispersivo.

La viscosità η e la resistenza al taglio τ_y della miscela variano principalmente in funzione della concentrazione volumetrica del sedimento C_v . Per calcolare la viscosità η e lo sforzo di taglio τ_y della miscela, FLO-

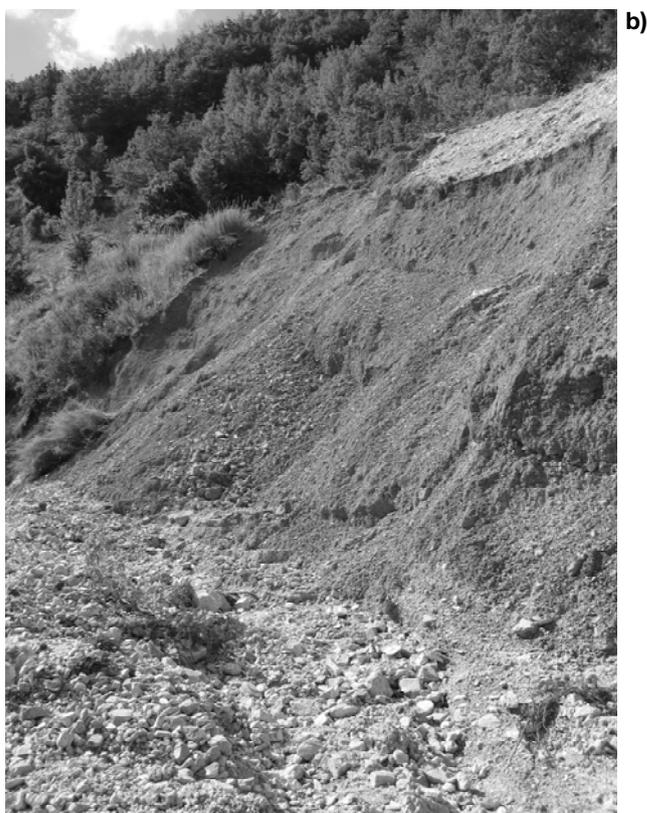


Fig. 6 - a) Colte detritica lungo il pendio laterale al Fosso di Terria, parzialmente vegetata, fotografata prima dell'evento del Giugno 2005; b) area di alimentazione laterale, fotografata dopo l'evento.

a) colluvial cover along a steep slope in the Terria basin, partially vegetated; the picture was taken before the debris flow of June 2005; b) lateral source area of debris material, the picture was taken after the event.

2D utilizza le seguenti relazioni empiriche:

$$\tau_y = \alpha_1 + \beta_1 C_v$$

$$\eta = \alpha_2 + \beta_2 C_v$$

dove α_1 , α_2 e β_1 , β_2 sono coefficienti empirici definiti in laboratorio (O'BRIEN E JULIEN, 1988).

In definitiva, ci sono due passi importanti da affrontare per iniziare una simulazione con FLO-2D: ottenere i dati topografici e determinare una colata detritica di progetto associata a un evento meteorologico estremo.

4. MODELLAZIONE DELLE COLATE LUNGO IL FOSSO DI TERRIA

4.1 Schema di lavoro

La procedura per lo studio degli eventi di colata avvenuti lungo il Fosso di Terria si articola in due fasi distinte, di seguito brevemente descritte. La prima fase ha previsto i seguenti passi:

- Realizzazione di un modello tridimensionale del terreno per l'individuazione del bacino idrografico di riferimento e delle sotto-aree di drenaggio per poter simulare il contributo che ciascun punto dell'area in esame fornisce al movimento dell'ammasso;
- Stima della pioggia massima attesa sul bacino di Terria mediante elaborazione delle registrazioni storiche derivanti da 5 pluviometri circostanti;
- Stima dell'idrogramma di massima piena con il metodo di Nash, mediante implementazione di un foglio di calcolo;
- Stima dell'idrogramma di progetto della colata detritica, mediante assegnazione di un valore di concentrazione per la fase solida;
- Scelta di una reologia per la colata di Terria, mediante procedure di back-analysis.
- Modellazione delle condizioni pre-intervento, stima delle caratteristiche dinamiche e cinematiche della colata in assenza di strutture di difesa.

La seconda fase ha previsto i seguenti passi:

- Modellazione delle condizioni post-intervento, stima delle caratteristiche dinamiche e cinematiche della colata in presenza di strutture trasversali in alveo

4.2 Elaborazioni topografiche del territorio di studio

La topografia del luogo in esame è un'informazione importante poiché questa influisce sullo spessore della colata, sulla velocità e sul suo deposito finale.

Allo scopo di ottenere un dato topografico di dettaglio, è stato realizzato un DTM (Modello Digitale del Terreno) del bacino del fosso di Terria, mediante elaborazione della cartografia vettoriale regionale in scala 1:10,000 disponibile (sezioni n. 336100, 336110, 336140, 336150). Tale DTM fornirà le informazioni topografiche di base per le successive simulazioni ed è costituito da una griglia a maglie quadrate la cui risoluzione al suolo dipende dalla grandezza delle maglie stesse (pari a 10 metri). Al modello sono state quindi sovrapposte le sezioni corrispondenti delle ortofoto a colori, per una "lettura" del territorio di studio più immediata. Successivamente, è stato delimitato il bacino idrologico di riferimento, che comprende l'asta principale e tutti i corsi minori di apporto laterale (Figura 7), per un'area complessiva di circa 4.36 Km².

4.3 Analisi Idrologica: stima delle piogge massime attese

E' ormai consolidato che le colate detritiche si verificano in occasione di eventi pluviometrici intensi

preceduti o meno da altre precipitazioni (ad es. BIANCO, 1999).

Per poter applicare convenientemente i modelli idrologici di trasformazione afflussi-deflussi cui occorre far ricorso per interpretare i debris flow che si manifestano lungo la rete idrografica in esame, si è proceduto all'analisi del regime delle piogge intense, utilizzando i dati registrati in corrispondenza di cinque pluviometri circostanti il bacino di interesse: stazioni di Leonessa (974 m slm), Terni (130 m slm), Spoleto (317 m slm), Monte Terminillo (1800 m slm) e Posta (750 m slm) (Figura 8).



Fig. 7 - Delimitazione del bacino del Fosso di Terria sovrapposto all'ortofoto a colori.

Aerial photo overlaid to the digital elevation model.



Fig. 8 - Pluviometri limitrofi all'area di studio utilizzati per la determinazione della massima pioggia attesa sul bacino.

Localization of the five rain gauges used for determining the "precipitation-duration-frequency" curves for the Terria watershed.

L'analisi, facendo riferimento a serie storiche di dati, è stata finalizzata alla determinazione delle linee segnalatrici di possibilità pluviometrica (LSPP) valide per il bacino di Terria. Una linea segnalatrice di possibilità pluviometrica è una curva che relaziona le coppie precipitazione - durata per determinati tempi di ritorno analizzati. In assenza di un pluviometro di riferimento per l'area in esame, il metodo che si è scelto di usare è stato quello di individuare i 5 pluviometri circostanti più vicini e utilizzare le loro registrazioni, effettuando un'operazione di media pesata rispetto alle distanze dei pluviometri di riferimento dal centroide del bacino di Terria. I risultati statistici così ottenuti, che individuano le massime piogge attese per tempi di ritorno pari a 50, 100 e 200 anni, sono mostrati in Figura 9.

I tempi di ritorno degli eventi pluviometrici del 2005 che hanno innescato le colate sono inferiori ai 200 anni, tuttavia si è scelto di adottare questo valore dalle considerazioni svolte nell'ambito della Direttiva PAI, in cui il tempo medio di ritorno nelle analisi di rischio viene ipotizzato in base ai beni da proteggere. In questo studio, quindi, l'attenzione è focalizzata sulla LSPP relativa ad un tempo di ritorno $T_r=200$ anni, che ben rappresenta le condizioni estreme di pioggia in corrispondenza di cui si possono verificare i fenomeni franosi tipo colata detritica (ad es: CAINE, 1980; BIANCO *et al.*, 1999).

In Tabella 1 si riportano gli spessori di pioggia massima derivanti dall'elaborazione. La relativa linea segnalatrice di possibilità pluviometrica, stimata per un tempo di ritorno (TR) pari a 200 anni, è esprimibile attraverso la seguente funzione:

$$R_d = 59.84 \cdot d^{0.35}$$

dove R_d è lo spessore di pioggia atteso e d è la durata della pioggia.

4.4 Stima dell'idrogramma di progetto della massima portata liquida attesa

Per la determinazione degli idrogrammi di massima piena, a partire dalle piogge cinquantennali e duecentennali si deve far riferimento ad opportune relazioni di trasformazione "afflussi - deflussi".

In questo studio, si è scelto di ricostruire l'idrogramma di progetto della portata liquida attraverso il metodo di NASH, espresso dalla relazione:

$$h(t) = \frac{A_b R_u}{(J - 1)!K} \left(\frac{t}{K} \right)^{J-1} e^{-t/K}$$

dove A_b è l'area del bacino, R_u la pioggia netta e K e J sono dei parametri funzione delle caratteristiche fisiche del bacino, scelti, rispettivamente, pari 3 (numero dei serbatoi, valore tipico per bacini di dimensioni ridotte) e 0.408 (secondo la formula di NASH, 1960).

In seguito, a partire dai valori di portata nel tempo, sono stati ricavati i rispettivi valori di picco da utilizzare nelle simulazioni. In tal modo si è in grado di simulare ciò che realmente accade quando un evento pluviometrico particolarmente intenso genera le condizioni critiche per l'innescò di un debris flow. Sono infatti gli scrosci violenti e di breve durata ad destabilizzare gli ammassi detritici (ad es: CAINE, 1980; REID, 1994; BIANCO *et al.*, 1999).

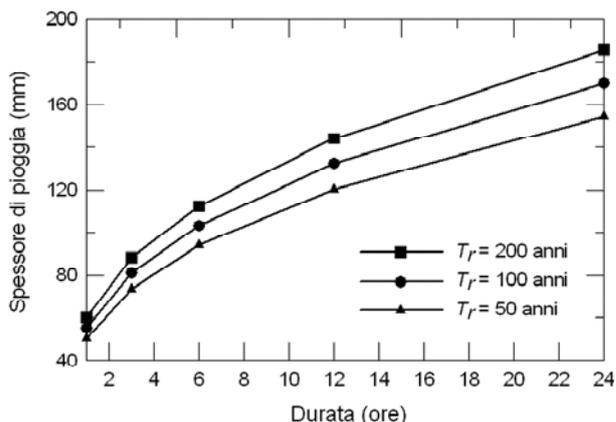


Fig. 9- Linee segnalatrici di possibilità pluviometrica per diversi tempi di ritorno.

Rainfall depth duration curves, for different recurrence intervals.

Tab. 1 - Spessori massimi di pioggia attesi (in mm) stimati per Terria per diversi tempi di ritorno (T_r) e per le durate di 1, 3, 6, 12, 24 ore.

Expected maximum heights of rainfall (mm) in the Terria basin, for different recurrence intervals and rainfall durations.

	1 ora	3 ore	6 ore	12 ore	24 ore
Tr 10	38.48	56.41	72.05	92.28	118.51
Tr 25	45.20	66.27	84.65	108.44	139.28
Tr 50	50.18	73.58	94.00	120.42	154.68
Tr 100	55.12	80.84	103.28	132.31	169.97
Tr 200	60.05	88.07	112.53	144.17	185.21

4.5 Stima dell'idrogramma di progetto della colata detritica

Per l'assegnazione dell'idrogramma della colata e della sua concentrazione sono state seguite delle linee guida pratiche che suggeriscono come assumere dei valori ragionevoli per le variabili che controllano i processi fisici dei flussi (JULIEN & O'BRIEN, 1997). Queste variabili includono, principalmente, la concentrazione dei sedimenti in acqua e le proprietà dei sedimenti e del fluido.

La concentrazione dei sedimenti varia durante il percorso della colata, dal suo innescò al suo arresto. Essendo un parametro molto variabile, non può mai essere riportato con assoluta certezza; esistono tuttavia delle linee guida da seguire nell'assegnazione della concentrazione di sedimenti in un idrogramma di piena:

- In corrispondenza del ramo ascendente dell'idrogramma di piena, determinato con Nash (o qualsiasi altra legge di trasformazione afflussi-deflussi), dovrebbe essere assegnata la concentrazioni di sedimenti più alta, per simulare l'ondata frontale;
- alla portata di picco dovrebbe essere assegnata una concentrazione di sedimenti leggermente inferiore all'ondata frontale per tenere conto della diluizione;
- i rami ascendente e discendente dell'idrogramma non dovrebbero avere meno del 20% della concentrazione volumetrica dei sedimenti;

- per dare origine ad un debris flow la concentrazione di sedimenti media dell'intero idrogramma dovrebbe rientrare tra il 25% e il 35% del volume con la concentrazione di picco dell'onda frontale compresa tra il 45% ed il 53% della concentrazione volumetrica.

Nel presente studio, all'idrogramma liquido è stata associata una concentrazione volumetrica variabile da 0.3 a 0.6 nei tratti ascendente e discendente dell'idrogramma.

4.6 Stima della reologia della colata di Terra

Le proprietà del fluido equivalente con cui viene schematizzata la colata variano con la concentrazione dei sedimenti e con i valori assegnati di viscosità e resistenza attritiva.

Per l'assegnazione di questi ultimi sono stati raccolti campioni di deposito, sia lungo l'asta fluviale, in corrispondenza delle aree dove localmente si sono creati lobi di accumulo (ad esempio per allargamenti della sezione dell'alveo o per locali riduzioni di pendenza), sia in corrispondenza dell'accumulo finale. Questi sono stati setacciati separando sabbia e ghiaia dalla frazione fine. In base alle linee guida precedentemente citate, infatti, quanto maggiore è la percentuale di sedimenti fini, tanto maggiore è la componente viscosa di comportamento. Al contrario, se la matrice più grossolana è preponderante, prevale un comportamento attritivo della massa in movimento, che principalmente giunge all'arresto per le collisioni intergranulari delle particelle. L'analisi granulometrica costituisce dunque un punto di partenza per avere informazioni qualitative sulla tipologia di comportamento. In Figura 10 sono riportate alcune delle prove granulometriche condotte lungo la mediana longitudinale del canale per diverse sezioni trasversali. Si osserva come la componente ghiaiosa e sabbiosa sia indubbiamente preponderante. Si precisa che tali analisi sono state effettuate su campioni di terreno prelevate a 50 - 80 cm dalla superficie, quindi nello strato superficiale che costituisce, teoricamente, lo strato mobilitato.

A partire da queste analisi, ed in mancanza di indagini reologiche specifiche, i valori dei parametri α_1 e β_1 per il calcolo di η e τ_y da assegnare alla colata di progetto sono stati stimati attraverso una procedura di calibrazione basata sul confronto con gli spessori dei depositi e sull'estensione dell'area alluvionata rilevati a seguito degli eventi noti. Sono state cioè eseguite una serie di simulazioni variando i valori della viscosità e della resistenza a taglio all'interno di un range predefinito di letteratura (O'BRIEN, 2002).

Per la calibrazione, i dati disponibili relativi all'evento del 2005 con cui confrontare i risultati includono attraverso rilievi diretti in situ:

- l'estensione dell'area alluvionata e la distanza di propagazione
- il volume del materiale depositato, pari a circa 16000 m³
- gli spessori dei depositi osservati, fino a 2.0 m nella zona di deposizione del fronte

La miglior corrispondenza è stata ottenuta per i parametri riportati di seguito in Tabella 2.

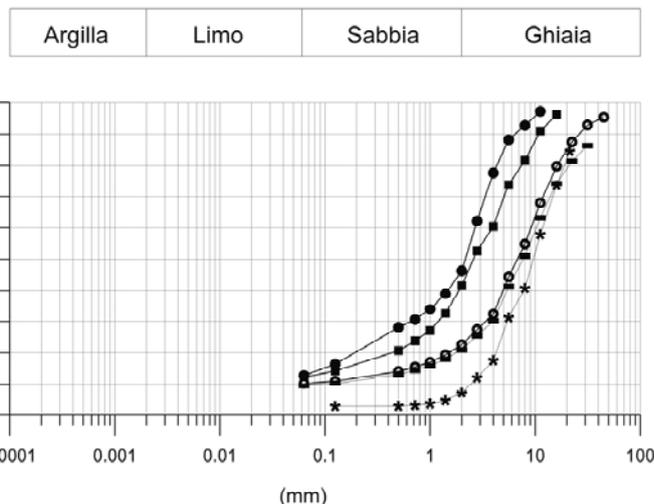


Fig. 10 - Analisi granulometriche lungo la mediana longitudinale per diverse sezioni.

Grain-size analysis for different cross-sections along the center of the channel.

5. RISULTATI DELLA SIMULAZIONE

Si riportano di seguito, in forma tabellare (Tabella 3), i valori dei parametri principali caratterizzanti il dissesto idrogeologico simulato. Per potenziali fenomeni di colate detritiche, associate ad eventi pluviometrici estremi con tempo di ritorno duecentennale, vengono mostrati i seguenti valori, risultati dalla modellazione predittiva svolta con FLO-2D: la massima altezza del flusso detritico, l'accumulo detritico depositato all'arre-

Tab. 2 - Parametri assegnati alla colata di progetto a seguito della procedura di back-analysis.

Values assigned to the rheological parameters after the back-analysis procedure.

$\tau_y = \alpha e \beta C$		$\eta = \alpha e \beta C_v$	
α_1	β_1	α_1	β_2
0.000707	29.8	0.00632	19.9

Tab. 3 - Risultati della simulazione per la colata di progetto.

Results from the dynamical simulations of the debris flow.

	$T_r = 200$ anni
Massima altezza del flusso detritico (m)	2.3
Accumulo detritico depositato (m ³)	19008.0
Volume totale mobilitato (m ³)	43800.0
Area inondata dal debris flow (m ²)	32848.0
Spinta dinamica (N/m)	18330.0
Spinta statica (N/m ²)	23770.0

sto della colata, il volume totale mobilitato, l'area inondata dal debris flow, la massima forza di impatto dinamica (impulsiva) posseduta dalla massa in movimento, e il massimo valore della pressione statica lungo il percorso della colata.

Dai risultati delle simulazioni si può constatare che, per tempi di ritorno duecentennali, possono verificarsi potenziali debris flow in grado di depositare e di rilasciare in conoide e sull'infrastruttura stradale ai piedi del centro abitato un volume stimato di oltre 19000 m³ (molto prossimo al valore rilevato in sito immediatamente dopo l'evento) e mobilitare un volume complessivo di oltre il doppio (circa 44000 m³). Il primo rappresenta il volume del lobo finale della colata in fase di arresto, quindi le volumetrie che hanno costituito il cumulo di deposito in corrispondenza della riduzione di pendenza. Il secondo rappresenta il volume complessivamente preso in carico e trasportato dalla colata che si è ridepositato durante il percorso, ad esempio creando argini laterali, senza raggiungere la zona di riduzione di pendenza. Il rapporto esistente tra queste due quantità è ampiamente documentato in letteratura (ad es: RICKENMANN & ZIMMERMANN, 1993; RICKENMANN, 1997)

In Figura 11 è mostrata la visualizzazione grafica dei risultati ottenuti mediante l'utilizzo del post processore Mapper, applicativo dello stesso software FLO-2D, per quanto riguarda l'estensione e lo spessore dei depositi. L'area di inondazione dei depositi è ben correlabile con quella effettivamente verificatasi in entrambi gli eventi di colata, così come gli spessori massimi raggiunti dal deposito.

6. MODELLAZIONE DELLE CONDIZIONI POST-INTERVENTO

Dai recenti sopralluoghi si è osservato come il bacino di Terria possieda ancora una notevole disponibilità di materiale potenzialmente mobilizzabile da eventi pluviometrici estremi, posto in zone ad elevata pendenza. Nel tratto del fosso di Terria localizzato immediatamente a monte dell'infrastruttura viaria, sono stati realizzati degli interventi di somma urgenza dopo l'evento dell'estate del 2005, costituiti da una serie di tre briglie selettive in maglie di acciaio che assolvono il compito di protezione passiva per la strada qualora si dovessero innescare ulteriori dissesti lungo l'alveo (Figura 12). Per la difesa attiva da tali fenomeni sono in progetto un sistema di briglie che giustifica il secondo set di simulazioni, di cui si parlerà a breve, attraverso cui verranno modellate le condizioni post-intervento modificate dalla presenza di opere di sbarramento in alveo.

6.1 Descrizione degli interventi previsti

L'intervento in progetto prevede un sistema di briglie che verranno inserite a monte di interventi già esistenti. L'area, cronologicamente, ha visto infatti la realizzazione delle seguenti opere:

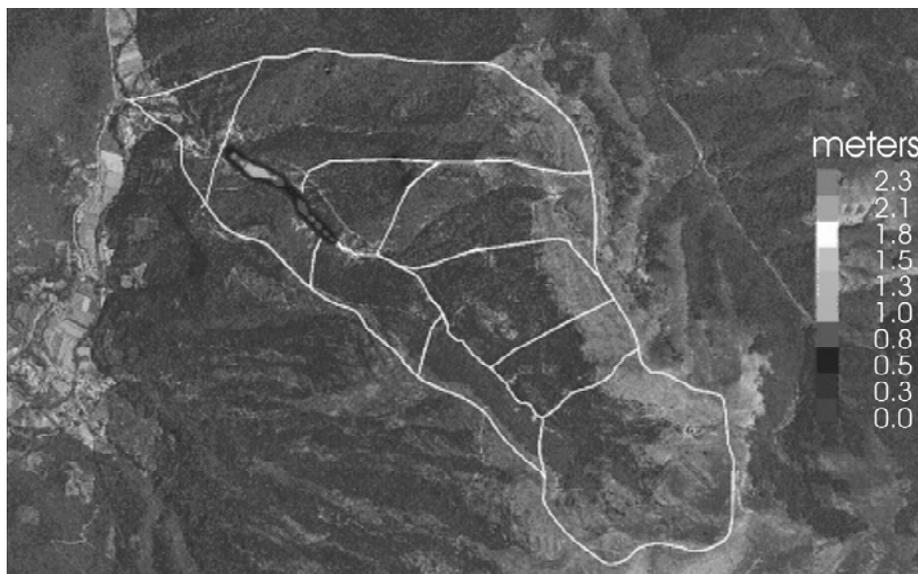


Fig. 11 - Risultati della simulazione utilizzando la colata detritica di progetto.

Results of the simulation using the "project" debris flow.



Fig. 12 - Briglie selettive in acciaio installate poche settimane dopo gli eventi di colata detritica per proteggere la strada dai sedimenti.

Selective steel check-dams installed few weeks after the debris flow events to protect the road from the sediment.

- a seguito di colate detritiche avvenute nel 1965 lungo lo stesso alveo vennero posizionate 4 briglie in gabbioni, poi completamente ricoperte nel corso degli anni da un notevole strato detritico al punto che non era più certa la loro localizzazione;
- a seguito della colata detritica del 2005, durante gli interventi di somma urgenza, sono state realizzate 3 briglie selettive in rete d'acciaio, posizionate a valle di quelle precedentemente citate, con lo scopo primario di proteggere la strada sottostante.

Il progetto prevede la realizzazione di otto briglie a monte delle quattro in gabbioni già esistenti, di cui le prime due, nel tratto più in alto dell'alveo, di altezza minore rispetto alle altre, che assolvono una funzione di consolidamento dell'alveo più che di trattenuta (quest'ultima svolta appunto dalle briglie più a valle).

6.2 Risultati della modellazione della colata detritica in presenza di opere in alveo

Tramite FLO-2D le briglie possono essere inserite all'interno del modello che schematizza il problema in esame. È interessante osservare come la presenza di queste opere modifichi le aree di espansione a valle del deposito detritico previste e i suoi spessori.

Partendo dalla planimetria dell'area di intervento, ciascuna briglia prevista dal progetto viene importata all'interno del GIS e inserita nel DTM del bacino di riferimento mediante creazione di uno shapefile. Ciascuna briglia va dunque ad interessare un elemento della griglia, all'interno del quale viene così modellata la struttura idraulica. La struttura idraulica da modellare comporta l'interruzione di una o più delle possibili otto direzioni che la colata può intraprendere all'interno di un elemento della griglia. Si riportano, pertanto, di seguito i risultati ottenuti dalle simulazioni riguardanti le situazioni pre e post intervento effettuate con i medesimi parametri geometrici e reologici utilizzati in tutte le prove precedentemente discusse (Tabella 4).

Come si può notare i valori risultano estremamente minori nel caso riguardante la situazione post intervento. Ciò è anche qualitativamente osservabile nelle visualizzazioni grafiche delle aree interessate dall'espansione dell'ammasso, presentate di seguito (Figura 13).

7. DISCUSSIONE CONCLUSIVA

Le colate detritiche sono fenomeni che possono avvenire manifestando scarsi preavvisi ed esercitando una notevole azione distruttiva su tutto ciò che cerca di ostacolarne il moto. La valutazione della pericolosità da colata è un compito molto complesso poiché vi concorrono numerosi fattori: da quelli meteorologici a quelli morfologici e meccanici. Per ridurre tale pericolosità possono

Tab. 4 - Suddivisione del bacino in nove sottobacini: situazione post intervento.

Subdivision of the basin into nine drainage areas: situation after the remedial works.

	$T_r = 200$ anni
Massima altezza del flusso detritico (m)	1.0
Accumulo detritico depositato (m^3)	4310.0
Volume totale mobilitato (m^3)	11510.0
Area inondata dal debris flow (m^2)	12592.0
Spinta dinamica (N/m)	600.0
Spinta statica (N/m^2)	9397.0

essere usati opere sia strutturali che non strutturali. Questi metodi, così come i piani di protezione, richiedono la zonizzazione delle aree deposizionali, che comunemente è condotta attraverso simulazioni con modelli matematici, anche se è ancora attualmente mancante una procedura di riferimento. In termini generali, la valutazione e la gestione della pericolosità richiedono la conoscenza di due argomenti principali: inizialmente deve essere stimata la possibilità che un evento avvenga in una determinata zona e in un determinato momento; in seguito, una volta che l'evento è stato innescato, l'obiettivo è conoscere il comportamento della massa in movimento, sia in termini di localizzazione dei percorsi che di posizioni raggiungibili dai sedimenti.

L'attendibilità dei risultati ottenuti è fortemente legata all'accuratezza con cui vengono rilevati i dati che costituiscono l'input per i codici di calcolo (dati pluviometrici ed idrometrici, topografia, osservazione di eventi simili a quelli da simulare, ecc.). Pertanto, soprattutto se sono carenti i dati con cui poter fare un'analisi di sensitività e calibrazione dei modelli, i risultati devono essere interpretati in base all'esperienza diretta.

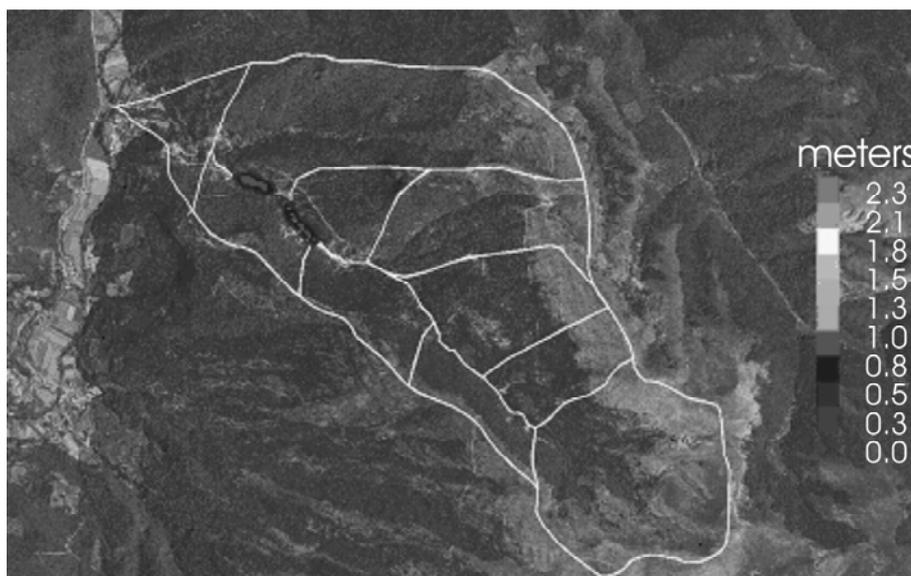


Fig. 13 - Risultati della simulazione utilizzando la colata detritica di progetto, nella condizione successiva alla realizzazione delle opere di mitigazione del rischio.

Results of the simulation using the "project" debris flow in the modified conditions by the planned countermeasures for the risk reductions.

RINGRAZIAMENTI

Questo articolo contiene parte dei risultati derivanti dallo studio finanziato dalla Convenzione di Ricerca tra il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Perugia ed il Comune di Ferentillo. Gli autori desiderano ringraziare il Servizio Difesa del Suolo ed il Servizio Geologico della Regione Umbria per il supporto tecnico durante le fasi del lavoro. Infine, gli autori ringraziano in modo particolare R. Morbidelli e C. Saltalippi per il supporto scientifico nella parte idrologica dello studio.

BIBLIOGRAFIA

- ARMANINI A. (1999) - *Previsione e prevenzione del rischio da colata di detriti* - In: Il rischio idrogeologico e la difesa del suolo, Accademia Nazionale dei Lincei, Atti dei Convegni Lincei, n. **154**, 13-44.
- BIANCO G., RUBERTO G., BROCHOT S. & LAIGLE D. (1999) - Progetto Interreg II Italia-Francia 1994-1999; Azione 5: Condivisione di metodi e conoscenze sui processi di lave torrentizie per la difesa dei centri abitati.
- CAINE N. (1980) - *The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows* - Geogr. Ann., Ser. A, v. **62**, p. 23-27.
- CALAMITA F. & DEIANA G. (1986) - *Geodinamica dell'Appennino umbro-marchigiano* - Memorie della Società Geologica Italiana, **35**, 311-316.
- CONVERSINI P., SALCIARINI D., FELICIONI G. & BOSCHERINI A. (2005) - *The debris flow hazard in the Lagarelle Creek in the eastern Umbria region, central Italy* - NHESS, vol. **5**, p. 275-283.
- CORRADINI C. & MELONE F. (1988) - *Spatial distribution of pre-warm front rainfall in the Mediterranean area* - Nordic Hydrology, **19**: 53-64.
- CROZIER M.J. & GLADE T. (2005) - *Landslide hazard and risk: issues, concepts and approach* - In: Glade, Anderson and Crozier (eds.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, 824 p.
- GUZZETTI F. & CARDINALI M. (1991) - *Debris-flow phenomena in the Central Appenines of Italy*. Terra Nova, **3**: 619-627.
- O'BRIEN S.J. (2002) - FLO-2D User Manual. FLO-2D Software Inc., USA.
- REID E.M. (1997) - *Slope instability caused by small variations in hydraulic conductivity*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering 123(8):717-725.
- SALCIARINI D, CONVERSINI P, & GODT JW (2006a) - *Characteristics of debris flow events in eastern Umbria, central Italy*. In: Proceeding of IAEG2006, London, UK.
- SALCIARINI D., GODT J.W., SAVAGE W.Z., CONVERSINI P., BAUM R.L. & MICHAEL J.A. (2006b) - *Modeling regional initiation of rainfall-induced shallow landslides in the eastern Umbria region of central Italy*. Landslide, vol. 3 n. 3.
- RICKENMANN D. (1997) - *Estimation des laves torrentielles, IAS* - Ingenieurs et Architectes Suisses, vol. **19**, 386-392.
- RICKENMANN D. & ZIMMERMANN M. (1993) - *The 1987 debris flow in Swizerland documentation and analysis*, Geomorphology, vol. **8**, 175-189.
- TAKAHASHI T. (1981) - *Debris flows*. Annual review of fluid mechanics, vol. **13**: 57-77.

Ms. ricevuto il 28 febbraio 2008
 Testo definitivo ricevuto il 30 maggio 2008

Ms. received: February 28, 2008
 Final text received: May 30, 2008