



---

## **Relazione scientifica finale del programma Short-Term Mobility svolto dal Dr. Piernicola Lollino (CNR – IRPI) presso l’istituto ETS dell’Università Politécnica de Madrid (Spagna)**

### **1. Introduzione**

Il Dr. Piernicola Lollino, ricercatore del CNR – IRPI (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica), in servizio presso l’U.o.S. di Bari dello stesso istituto, è risultato vincitore di una borsa Short-Term Mobility 2013 del CNR, nell’ambito della quale ha svolto un periodo di soggiorno di 21 giorni presso il *Departamento de Matemáticas et Informática Aplicadas a la Ingeniería Civil - Escuela Técnica Superior (ETS) de Ingenieros de Caminos* dell’Universidad Politécnica de Madrid (Spagna). Tale periodo di soggiorno è stato svolto a partire dal 1 settembre 2013 sino al 21 settembre 2013.

L’Escuela Técnica Superior (ETS) de Ingenieros de Caminos è un’istituzione tecnico-scientifica di alto prestigio, tra le più antiche della Spagna, risalente al 1802, per la formazione di alto livello di ingegneri civili (<http://www.upm.es/internacional/UPM/Centres/CampusCiudadUniversitaria/ETSICivil>). Oggi è parte dell’Università Politecnica di Madrid, qualificata a livello internazionale come università di eccellenza. L’istituzione ospitante specifica è il “Departamento de Matemáticas et Informática Aplicadas a la Ingeniería Civil”, che svolge ricerca nel campo della modellazione numerica applicata ai diversi settori dell’ingegneria civile; il direttore attuale del Dipartimento è il Prof. Manuel Pastor Pérez, membro della Royal Academy of Sciences di Siviglia, che è stato supervisore della ricerca svolta dallo scrivente nell’ambito del programma STM in oggetto. In particolare, il gruppo di ricerca guidato dal Prof. Pastor ha sviluppato codici di calcolo in ambito tridimensionale per la simulazione di processi di evoluzione e propagazione di frane a cinematica veloce con il metodo SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*).

Il titolo del programma svolto dallo scrivente può essere così sintetizzato: *Modellazione numerica del processo di propagazione di un grande frana tipo colata di terra per l’analisi*



a ritroso dell'area di invasione della frana e delle relative caratteristiche cinematiche (Numerical modelling of the propagation of a large flow-type landslide for the back-analysis of the run-out distance and landslide kinematics).

Il progetto di ricerca si contestualizza nell'ambito degli studi riguardanti la previsione del rischio da frana associato ai processi di movimenti di massa di versante caratterizzati da propagazione di grande distanza ed elevata mobilità del materiale detritico. Tali processi franosi, infatti, possono determinare gravi danni per le strutture e le infrastrutture ubicate lungo il percorso seguito dalla stessa frana e, come tali, rappresentano fenomeni in genere classificati come di rischio elevato. In particolare, la previsione delle caratteristiche cinematiche (direzione ed estensione del percorso seguito nello spazio da parte della massa detritica, velocità, tempi di percorrenza) già nelle prime fasi di occorrenza può risultare in simili casi particolarmente utile a ridurre e mitigare gli effetti disastrosi di questi processi. La ricerca, pertanto, intende verificare le potenzialità del metodo numerico SPH, che simula la propagazione di una massa di terreno instabile su un modello digitale del terreno di tipo tridimensionale, per la simulazione dei processi di frana classificati in letteratura come colate di terra (*earthflow*) o colate di fango (*mudflow*), molto frequenti nei contesti dell'intera catena appenninica italiana. Inoltre, lo studio intende perseguire l'indagine del ruolo ricoperto da alcuni specifici fattori nel controllo dello stesso meccanismo di propagazione delle masse instabili e, dunque, della cinematica degli stessi processi.

La principale attività del programma di ricerca svolto è consistita, quindi, nella simulazione numerica mediante codice di calcolo tipo SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*) delle caratteristiche cinematiche del processo di propagazione della frana di Montaguto (AV) occorsa tra il 2005 ed il 2006, che ha causato gravi danni ad importanti infrastrutture di trasporto. Qui, la frana di Montaguto è considerata come caso di studio rappresentativo di una categoria di frane molto diffusa lungo tutto l'Appennino Italiano, che causa diffusamente danni ingenti. Nello specifico, si è verificata l'applicabilità del metodo SPH nella previsione delle caratteristiche cinematiche del processo di propagazione di una colata di terra (*earthflow*) di grandi dimensioni, in relazione allo spazio percorso ed al tempo, nella prospettiva di un utilizzo dello stesso strumento di calcolo per la previsione spazio-temporale di processi franosi analoghi.

In tale prospettiva, durante il periodo di soggiorno all'estero, il fruitore, Dr. Piernicola Lollino, ha svolto analisi numeriche con il codice di calcolo *Flow\_SPH*, sviluppato dai



ricercatori dell'istituzione ospitante, per la simulazione del processo di propagazione della massa di terreno instabile durante l'evento di riattivazione della frana di Montaguto nel 2005-2006. Sono state condotte inizialmente analisi di tipo parametrico al variare di alcune proprietà fisico-meccaniche ed idrauliche del terreno che sono ritenute condizionanti rispetto allo stesso fenomeno di propagazione della frana, quali ad esempio le caratteristiche di resistenza al taglio del materiale coinvolto nella propagazione, le sovrappressioni interstiziali sviluppate nella massa in frana all'inizio del processo di propagazione come causa innescante la stessa instabilità, e la relativa dissipazione nel tempo controllata dal coefficiente di consolidazione del terreno che costituisce la massa in frana. Tali analisi sono state utili a verificare il ruolo dei singoli fattori nel controllo del processo evolutivo, avendo come termine di calibrazione le caratteristiche cinematiche della massa di frana effettivamente osservate in sito. Tutto ciò nella prospettiva di pervenire alla definizione di un modello numerico finale maggiormente rappresentativo ed aderente al comportamento reale della frana in sito.

## **2. Il metodo SPH ed il codice di calcolo *Flow\_SPH***

Il modello matematico adottato per lo studio della propagazione della frana di Montaguto è il modello SPH (*Smooth Particle Hydrodynamics*), che prevede integrazione delle equazioni di campo rispetto alla sola profondità di una massa (*depth-integrated model*) ed è derivato dalle equazioni di Biot-Zienkiewicz per materiali a comportamento non lineare e problemi di grandi deformazioni. In tali ipotesi, la massa di terreno considerata è ipotizzata equivalente ad un fluido, per cui rispetta le leggi che regolano il moto di un fluido lungo una superficie di base. In questo contesto, in chiave di semplificazione delle procedure di soluzione delle equazioni di conservazione della massa e di conservazione della quantità di moto per il sistema *scheletro solido – fluido interstiziale*, il modello integra le stesse equazioni rispetto alla sola direzione verticale ed è ipotizzato equivalente ad un continuo bidimensionale in cui ogni punto mobile rappresenta una colonna di materiale, che si estende dalla base fino alla superficie libera e che viaggia con una velocità mediata rispetto alla profondità della stessa colonna. Per tale ragione, detto modello non può ritenersi un modello esatto di tipo Lagrangiano, perché i punti mobili non hanno connessione con le particelle del materiale, ma può essere denominato “quasi Lagrangiano” o con una formulazione arbitraria “Lagrangiana-Euleriana”. Nato nel campo



della idrodinamica dei fluidi, il principale vantaggio del modello consiste nella riduzione significativa del tempo di calcolo se confrontato ad un codice di calcolo ad elementi finiti standard basato su un approccio convenzionale di tipo Euleriano, che non prevede una simile semplificazione dell'integrazione rispetto alla profondità del fluido. Il modello integrato rispetto alla profondità di tipo 2D, dunque, presenta una combinazione ottimale di accuratezza e semplicità ed è in grado di fornire importanti indicazioni circa il percorso e la velocità di propagazione di una massa, il tempo di percorrenza, la profondità del flusso in una certa posizione. Il sistema di riferimento adottato nel modello, con la simbologia relativa alla superficie di base ed alla massa di frana è riportato in Figura 1.

La teoria alla base del modello qui adottato è descritta nel dettaglio in Pastor et al. (2009), mentre modelli pregressi di tipo integrato sulla profondità sono stati presentati in passato da Savage and Hutter (1991), Hutter and Koch (1991), Laigle and Coussot (1997), Mc Dougall and Hungr (2005).

Le pressioni interstiziali nella massa di terreno sono governate nel modello qui descritto attraverso la sola equazione della consolidazione verticale secondo la classica teoria di Terzaghi.

I risultati del modello di cui sopra dipendono significativamente dal modello reologico scelto, il quale correlando il tensore delle tensioni al tensore del gradiente di deformazione e, di conseguenza, al campo delle velocità, influenza l'attrito di base e le tensioni integrate rispetto alla profondità. Nel codice di calcolo *Flow\_SPH* sono disponibili vari modelli reologici, tra cui le più importanti sono la legge di fluido attritivo-consolidante, la legge di viscosità secondo Bingham o la legge di fluido secondo Herschel-Bulkley.

Nell'analisi di frane di tipo fluido, il flusso istantaneo in un dato punto può essere studiato come flusso uniforme di tipo stazionario. Considerando un flusso 1D lungo un canale con pendenza costante pari a  $\theta$  (modello di pendio indefinito), la sola componente di velocità diversa da zero è quella in direzione parallela alla base, che varia lungo l'asse normale alla base.

La legge reologica generale è del tipo:

$$\tau = c + \sigma_n \operatorname{tg}\phi + \mu(\delta v / \delta z)$$

per cui combinando opportunamente questi tre contributi è possibile estrarre diversi modelli reologici (Newtoniano, fluido attritivo, secondo Bingham, ecc.).

Quindi, le equazioni di campo (conservazione della massa e conservazione della quantità di moto) sono risolte con il metodo noto come SPH, un metodo particellare in cui il dominio di flusso è rappresentato da punti nodali che si muovono insieme al flusso e sono



distribuiti nello spazio senza una struttura di griglia ben definita. Ogni punto nodale porta alcune informazioni scalari, quali la densità, la pressione, le componenti di velocità, ecc. L'interazione tra i punti nodali e l'interpolazione da un set di nodi  $N$  per trovare il valore di una particolare quantità in un punto arbitrario sono ottenuti mediante una funzione "peso", anche chiamata funzione "*kernel*" o funzione "*smoothing*" (Figura 2). Di qui, l'uso del termine "*meshless*" ad indicare questo tipo di modelli numerici, che infatti sono privi di una vera e propria griglia di discretizzazione. In tale ottica, un parametro importante nel modello risulta proprio la lunghezza di appiattimento (*smoothing*),  $h$ , definita come la distanza da ogni nodo dove la funzione weighting si annulla.

Maggiori dettagli circa le formulazioni matematiche del modello sono riportate in Pastor et al. (2009).

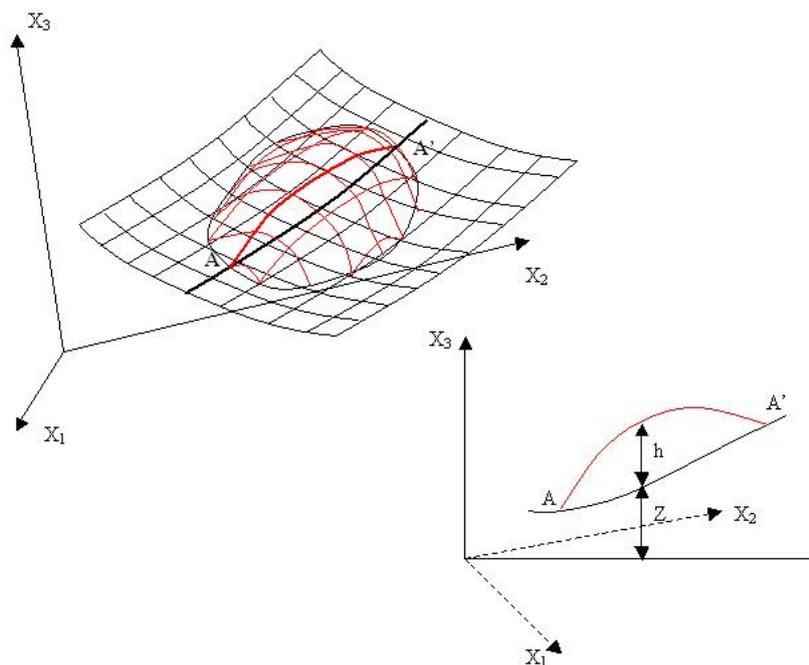


Figura 1. Sistema di riferimento e notazione adottata nel modello SPH.

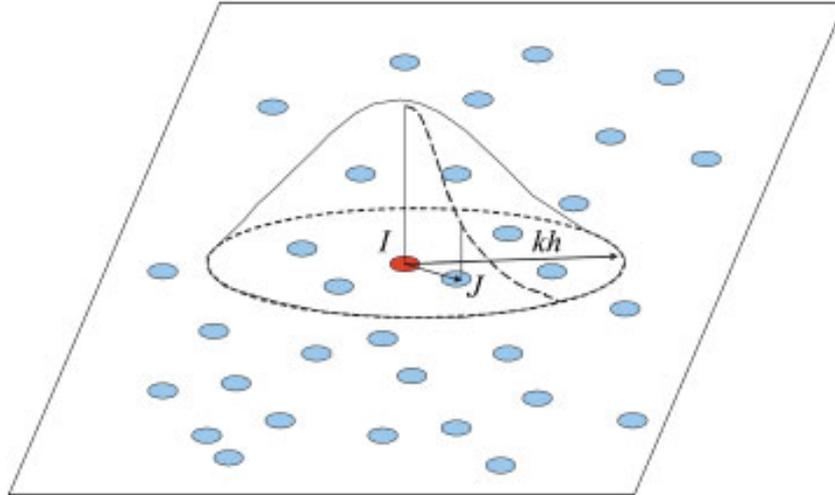


Figura 2. Nodi ed integrazione numerica in una mesh SPH

### 3. La frana di Montaguto (AV) come caso rappresentativo delle colate di terra

La frana di Montaguto (AV, Italia Meridionale) può essere classificata come una estesa colata di terra, che si è attivata nell'inverno 2004-2005 lungo il versante nord della valle del fiume Cervaro, in località San Martino, ed è arrivata al piede del versante nell'Aprile 2006, dove il significativo apporto di materiale detritico ha prodotto l'interruzione di importanti infrastrutture viarie presenti nell'area. Il volume di frana è stato stimato intorno a 4 milioni di  $m^3$  di terreno, con uno sviluppo longitudinale complessivo della frana pari a circa 3 km, mentre la velocità media di movimento è stata stimata intorno a  $6 \div 7$  m/giorno. L'intera frana può essere suddivisa in 3 settori, rispettivamente la zona sorgente, la zona di propagazione (o canale) e la zona di accumulo al piede. Lo spessore del deposito di frana varia tra 4 a 30 m, con un aumento dello stesso in direzione di valle. La pendenza media del versante è elevata nell'area sorgente della frana (circa pari a  $15^\circ$ ), mentre nel tratto centrale di propagazione è compresa tra  $4^\circ$  e  $9^\circ$ . Uno studio geomorfologico delle diverse riattivazioni occorse lungo il versante negli ultimi decenni e del processo franoso specifico del 2005 - 2006 è riportato in Giordan et al. (2013).

Nella parte superiore del versante la geologia è costituita prevalentemente da un affioramento di terreni afferenti alla formazione del Flysch di Faeto, costituiti da argille miste a calcari e calcareniti secondo un assetto caotico, mentre nella porzione centrale ed inferiore dello stesso versante affiorano i terreni della formazione di Villamaina, costituiti da argille marnose consistenti. Il detrito di frana trasportato dalla frana è pertanto costituito da materiale rimaneggiato e destrutturato originariamente appartenente alla formazione del Flysch di Faeto della zona sorgente, mentre i terreni della formazione di Villamaina



hanno rappresentato il substrato stabile al di sopra del quale è avvenuto lo scorrimento del materiale di frana proveniente dalle aree superiori del versante.

Il principale corpo di frana costituente la colata di Montaguto è stata generata verosimilmente al piede della zona sorgente nella primavera del 2005 ed è arrivata al piede del versante a fine Aprile 2006, percorrendo una distanza media di run-out pari circa a 2200 – 2400 m. Pertanto, sulla base di questa ricostruzione la velocità media di propagazione è risultata compresa tra 6 e 7 m/giorno. Secondo gli studi condotti dallo scrivente, la colata di terra di Montaguto è stata presumibilmente attivata per effetto delle sovrappressioni interstiziali generate da processi di carico non drenati attivi nell'area sorgente o immediatamente a valle di essa per effetto della spinta o del sovraccarico prodotto dal materiale riversato dalla frana nella zona sorgente sulle porzioni iniziali del canale sottostante. Pertanto, le analisi numeriche condotte con il metodo SPH, con l'ausilio del codice di calcolo *Flow\_SPH*, sono state finalizzate alla verifica del meccanismo di innesco e propagazione della stessa colata come effetto delle stesse sovrappressioni generatesi nella zona sorgente all'inizio dello stesso processo. Ne deriva che tutto il processo di propagazione (o *run-out*) è stato controllato dal processo di consolidazione idraulica dei materiali coinvolti, fino alla zona di accumulo al piede del versante, dove presumibilmente dette sovrappressioni si sono ridotte a valori bassi che hanno comportato l'arresto della massa.

Nelle Figure 3 e 4 sono mostrate le variazioni topografiche misurate come differenza tra il DTM del 2004 (geometria pre-frana del versante) e quello del 2006 (geometria post-frana del versante), sia per la zona sorgente che per quella di accumulo. Nelle stesse figure sono riportate anche le ortofoto del 2010 degli stessi settori della frana.

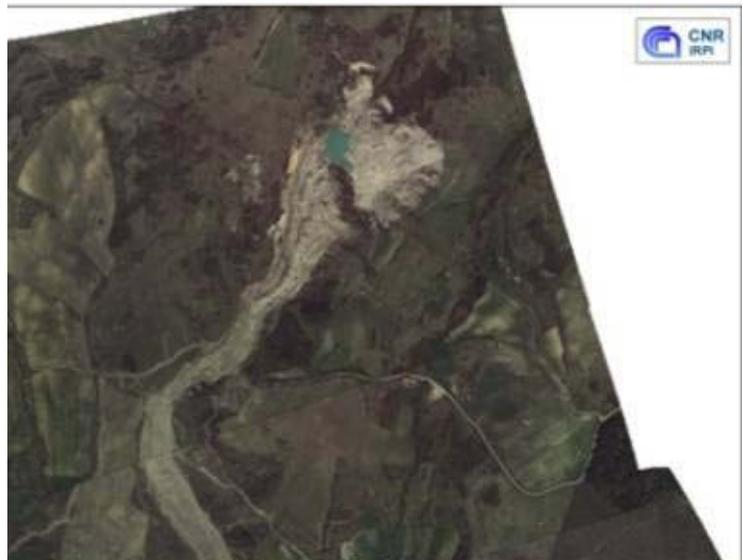
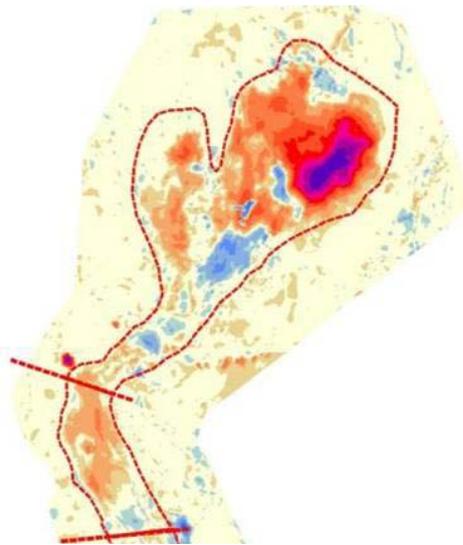


Figura 3. (a) Variazioni topografiche della zona sorgente e del tratto iniziale del canale misurate tra condizione pre- e post-frana; (b) Ortofoto 2010: zona sorgente della frana

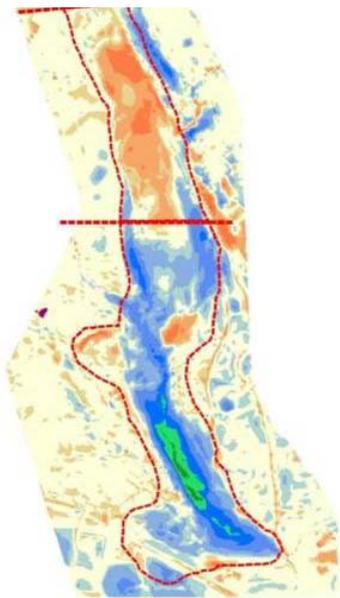


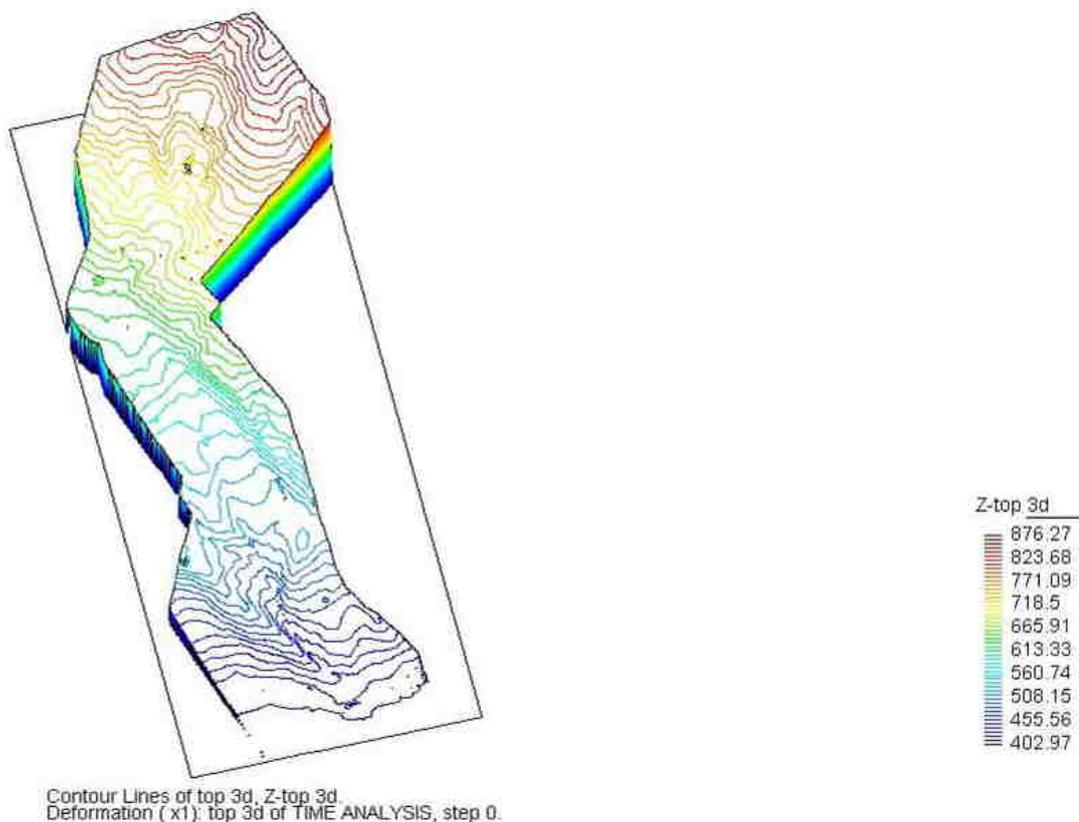
Figura 4. (a) Variazioni topografiche della zona di accumulo misurate tra condizione pre- e post-frana; (b) Ortofoto 2010: zona di accumulo della frana

#### 4. Analisi numeriche

Le analisi numeriche con il codice di calcolo *Flow-SPH* svolte dallo scrivente durante la permanenza a Madrid nell'ambito del programma Short-Term Mobility hanno avuto come principali finalità quella di indagare la propagazione nello spazio della massa di frana



attivatasi lungo il versante in esame nel biennio 2005 – 2006 nonché di studiare il meccanismo che ha consentito la mobilità della stessa massa di frana. Le analisi hanno avuto come principale dato di ingresso di tipo geometrico la topografia del versante di base lungo la quale è avvenuto il movimento della frana ed il volume di frana distaccatosi nella porzione a monte e scivolato successivamente lungo il versante. Nello specifico, la geometria di partenza del versante è stata simulata utilizzando un DTM (Digital Terrain Model) del 2004 con lato della griglia pari a 5 m. In Figura 5 è riportata la stessa geometria rappresentata mediante le isolinee di pari quota assoluta.



*Figura 5. DTM (Digital Terrain Model) di base, con griglia di 5 m, adottato per lo svolgimento delle analisi*

La geometria della massa di frana è stata invece modellata definendola attraverso una differenza tra il DTM del 2004 (pre-frana) ed il DTM del 2006 (post-frana), assunte entrambe con passo della griglia pari a 10 m. In figura 6(a) è mostrata una visualizzazione della geometria della massa di frana nelle condizioni di partenza ottenuta come contours delle altezze della massa di frana.



L'ipotesi riguardante il meccanismo di innesco del processo di propagazione e di controllo della successiva evoluzione cinematica formulata dallo scrivente prevede lo sviluppo di sovrappressioni interstiziali nella massa di frana come effetto di processi di carico non drenati occorsi per effetto dell'attivazione della stessa frana nell'area sorgente. Pertanto, in tale prospettiva si è ipotizzato che le sovrappressioni interstiziali nella massa di frana all'istante iniziale ( $t = 0$ ) siano uguali a  $\Delta u_0 = 0.6 \times \sigma_v$ , dove  $\sigma_v$  è la tensione verticale della massa in un generico punto, ottenuta come prodotto del peso unità di volume del terreno per l'altezza della massa di frana nello stesso punto.

Il modello viscoso adottato nel calcolo è il modello di "fluido attritivo", con massa di frana soggetta ad un processo di consolidazione verticale con drenaggio verso il contorno superiore (superficie topografica del terreno). In tali ipotesi, la resistenza alla base della massa in movimento risulta totalmente controllata dal valore dell'angolo di attrito assunto, che nello specifico è stato ipotizzato pari a  $\phi' = 13^\circ$ , sulla base dei risultati delle indagini di laboratorio svolte su campioni prelevati nella stessa massa di terreno. Il processo di consolidazione del terreno risulta invece controllato dal valore assegnato del coefficiente di consolidazione del terreno,  $c_v$ , che nel caso in esame è stato imposto pari a  $c_v = 1e-06$  m<sup>2</sup>/s, in accordo con i risultati di prove in sito condotte con l'ausilio di piezometri in continuo.

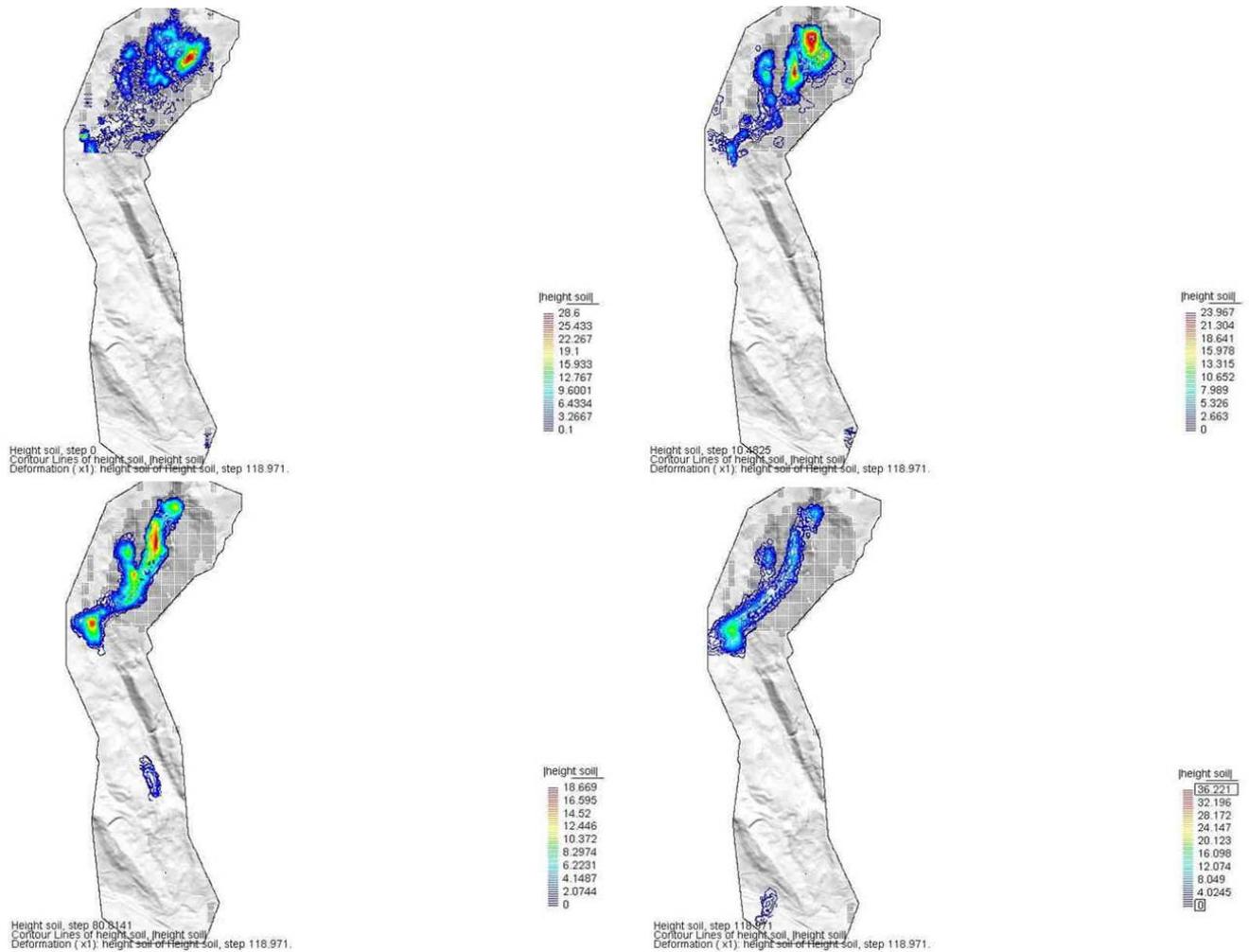


Figura 6. Fase di propagazione 1: (a) Massa di frana nelle condizioni di partenza - il volume della massa instabile è stato dedotto come differenza tra i DTM relativi al 2004 e 2006; (b) e (c) evoluzione cinematica intermedia della massa di frana; (d) geometria finale della massa di frana.

I risultati della simulazione relativi alla prima fase di propagazione del fenomeno franoso sono riportati nelle figure 6 e 7, rispettivamente come contours delle altezze della massa di frana e contours delle sovrappressioni interstiziali nella stessa massa. La figura 6(a) mostra come il maggior volume di terreno coinvolto nella frana sia localizzato nella porzione nord-occidentale del versante (zona in rosso in figura), dove gli spessori della massa instabile sono superiori a 25 m. I risultati del modello mostrano che nelle fasi successive all'istante iniziale la massa instabile subisce una traslazione in direzione Nord-Est e successivamente una rotazione verso la direzione di valle del versante, incanalandosi in direzione Sud-Est all'interno dell'alveo del torrente Tre Nocelle, ivi esistente (Figura 6b). Quindi, in figura 6c si osserva un successivo trasferimento di massa, con aumento degli spessori della massa di frana nel canale in direzione valle. Nella stessa



figura si osserva altresì il significativo apporto di massa dalla scarpata laterale posizionata in zona ovest rispetto alla principale scarpata prima descritta. Sulla base dei risultati delle simulazioni si può affermare quindi che buona parte della massa di frana si sia trasferita alla base del primo tratto del canale di frana, in corrispondenza del “ginocchio” dell’intero canale, posto a quota 700 m s.l.m. (figura 6d). In quest’area, i risultati indicano un arresto del processo di propagazione, poiché la massa di frana tende a non avanzare e a ridurre a zero la propria velocità. Tale arresto del processo di propagazione è da ricondursi alla dissipazione progressiva delle sovrappressioni interstiziali della massa di frana occorsa durante le fasi pregresse, per cui in corrispondenza della stessa zona del “ginocchio” del canale, le sovrappressioni sono ridotte a valori molto bassi, tali da non consentire il movimento della massa di frana lungo un settore del canale caratterizzato da pendenze molto blande, come quello in corrispondenza del ginocchio. In Figura 7(a) sono riportati i contours delle sovrappressioni interstiziali all’istante iniziale ( $t = 0$ ), dove in rosso sono mostrate le zone della massa con rapporto sovrappressione/tensione totale pari a 0.6. Nelle figure 7(b) e 7(c) sono invece mostrati i contours dello stesso rapporto nelle fasi successive di propagazione, nei quali si osserva che in corrispondenza del “ginocchio” le sovrappressioni interstiziali si riducono significativamente e raggiungono valori molto più bassi di quelli di partenza (aree in blu in figura).

Tali risultati suggeriscono che in corrispondenza di questa zona intermedia del canale di frana la massa instabile abbia ridotto significativamente la sua mobilità a causa della dissipazione delle sovrappressioni iniziali e che presumibilmente la prosecuzione della propagazione sia da ricondursi alla generazione di nuove sovrappressioni interstiziali indotte da processi di carico di tipo non drenato occorsi nella stessa zona. Tali processi di carico non drenato possono essere stati presumibilmente generati dalla forte variazione di pendenza del versante esistente tra la zona superiore del canale e quella del ginocchio, per cui masse in arrivo dai tratti superiori hanno premuto e sovraccaricato le masse precedentemente depositatesi nella stessa area.

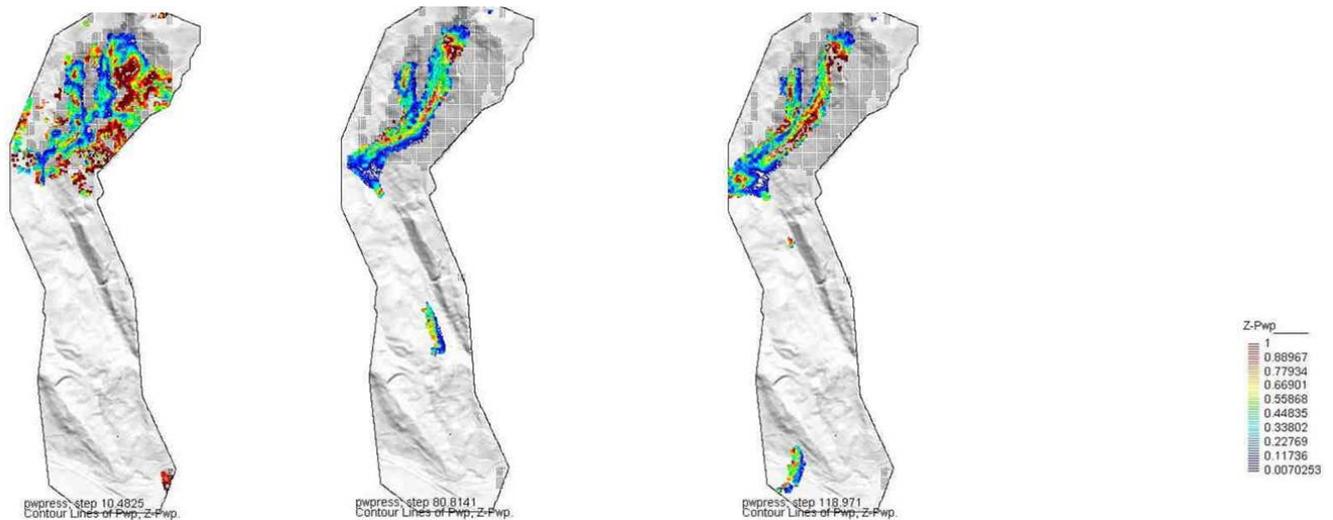


Figura 7. Fase di propagazione 1: (a) Distribuzione delle sovrappressioni interstiziali nel corpo di frana nelle condizioni iniziali (a), in una condizione intermedia (b) e nelle condizioni finali (c).

I risultati della simulazione riguardante la seconda fase di propagazione del fenomeno franoso sono riportati nelle figure 8, 9 e 10, rispettivamente come contours delle altezze della massa di frana (Figure 8 e 9) e contours delle sovrappressioni interstiziali della stessa massa (Figura 10). Tale seconda fase dell'analisi presuppone che la mobilità della colata di terra sia stata riavviata proprio dalla generazione di nuove sovrappressioni interstiziali nella stessa massa, come prima descritto. In assenza di informazioni precise a riguardo dei valori delle sovrappressioni effettivamente generatesi in sito, si è fatta la stessa ipotesi di sovrappressioni interstiziali nella massa di frana pari a 0.6 volte il valore della tensione totale verticale calcolata nel generico punto. Il volume della massa di frana di partenza in questa seconda fase della propagazione è stata ipotizzata uguale al volume della massa di accumulo al ginocchio del canale al termine della prima fase (Figura 8a). La Figura 8b mostra che nelle fasi successive all'istante  $t = 0$ , la massa inizia a mobilitarsi verso il canale del Rio Nocelle, sebbene un'aliquota del volume tende a deviare verso il canale del rio Tre Confini, ubicato in posizione adiacente ad Est del canale Nocelle. Le Figure 8c e 8d documentano come il flusso della massa di frana si propaga all'interno del canale Nocelle seguendo la conformazione naturale dell'alveo del torrente che presenta un andamento ad "S".

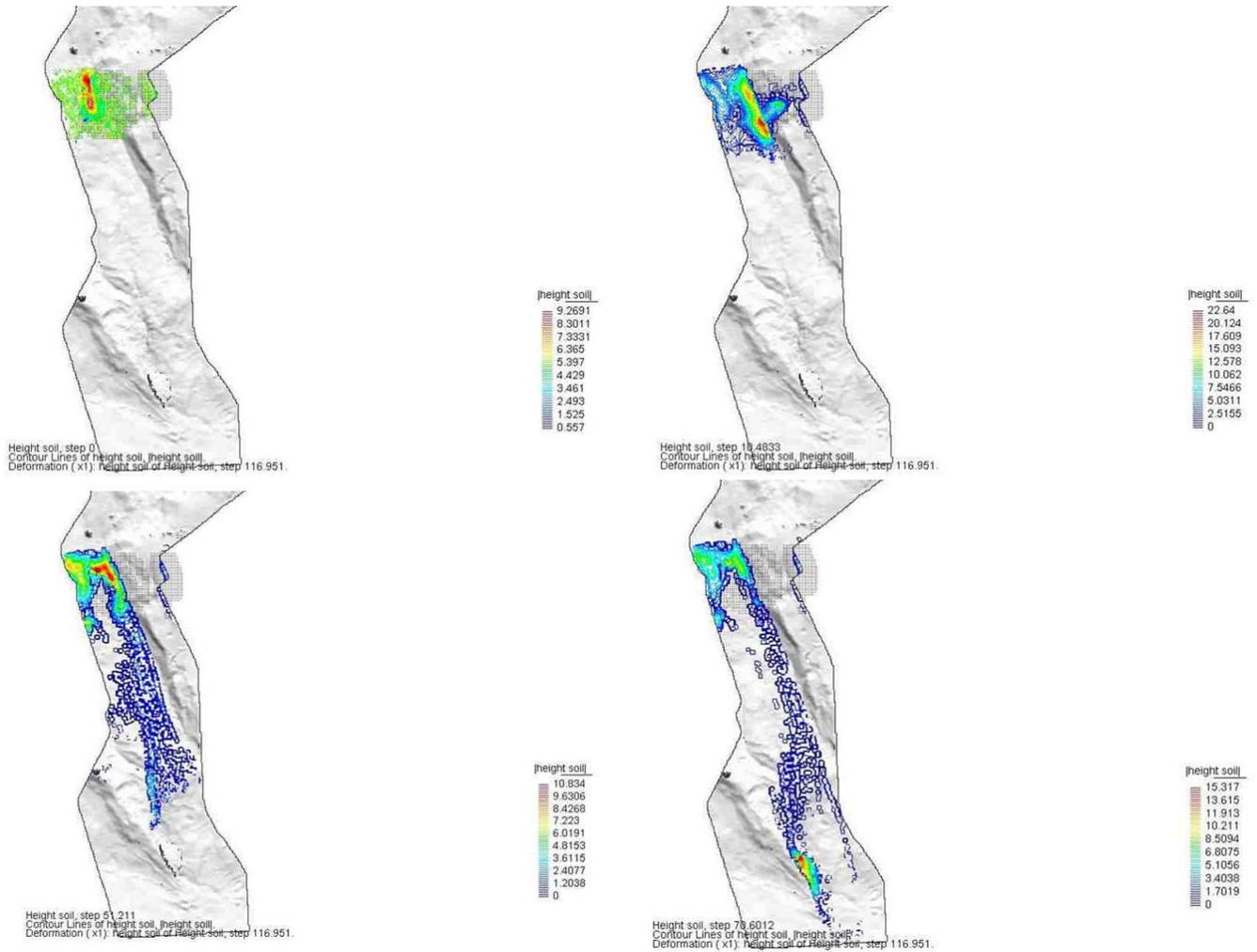
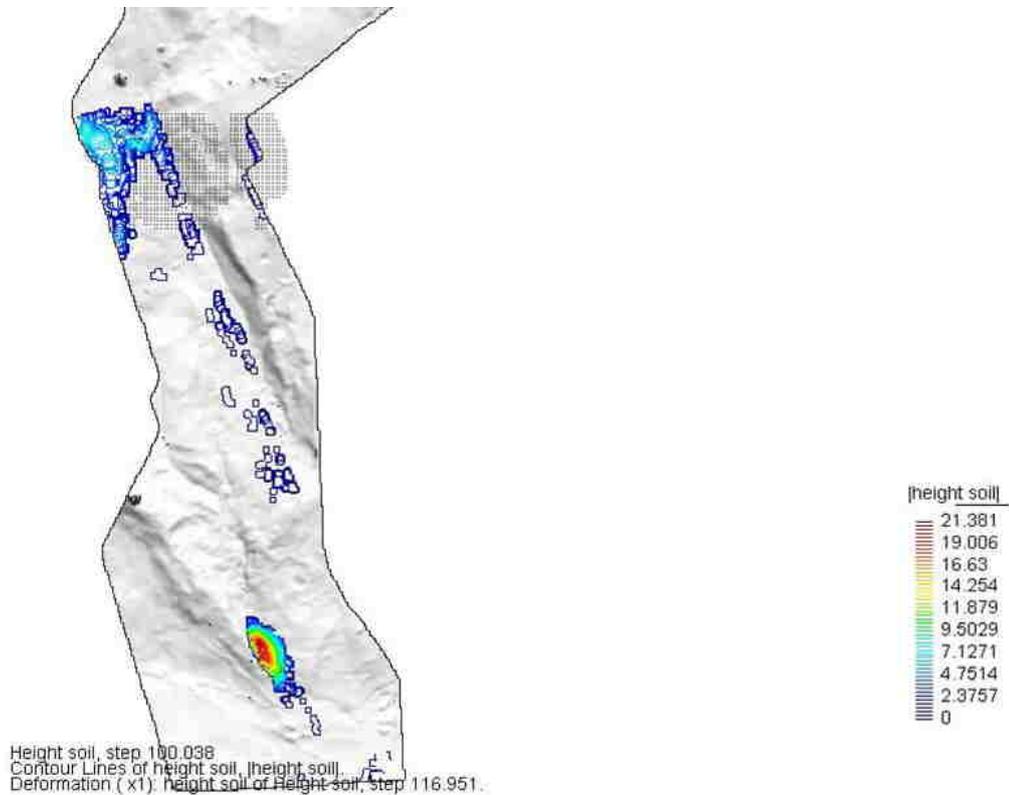


Figura 8. Fase di propagazione 2: (a) Massa di frana nelle condizioni di partenza - il volume della massa instabile è stato ipotizzato pari al volume di accumulo al termine della prima fase di propagazione; (b), (c) e (d) evoluzione cinematica intermedia della massa di frana.

In Figura 8d si osserva come il detrito di frana inizia a depositarsi al piede del versante, dove l'alveo del rio Nocelle sfocia nella piana del fiume Cervaro. In Figura 9 è mostrato l'accumulo del materiale di frana al piede del versante, che raggiunge altezze anche superiori a 20 m (zona in rosso).

Tale risultato è coerente con l'osservazione del fenomeno reale, che ha previsto altezze di accumulo dei detriti nella stessa zona superiori a 20 m (Figura 4).



*Figura 9. Fase di propagazione 2: geometria finale della massa di frana*

In Figura 10(a) sono riportati i contours delle sovrappressioni interstiziali all'istante iniziale ( $t = 0$ ) di questa seconda fase di propagazione, dove in verde sono mostrate le zone della massa con rapporto sovrappressione/tensione totale pari a 0.6. In figura 10(b) sono invece mostrati i contours dello stesso rapporto nella fase finale di propagazione, quando la maggior parte della massa in frana ha raggiunto il piede del versante, in cui si osserva che le sovrappressioni interstiziali si riducono significativamente e raggiungono valori molto più bassi di quelli di partenza (aree in blu in figura).

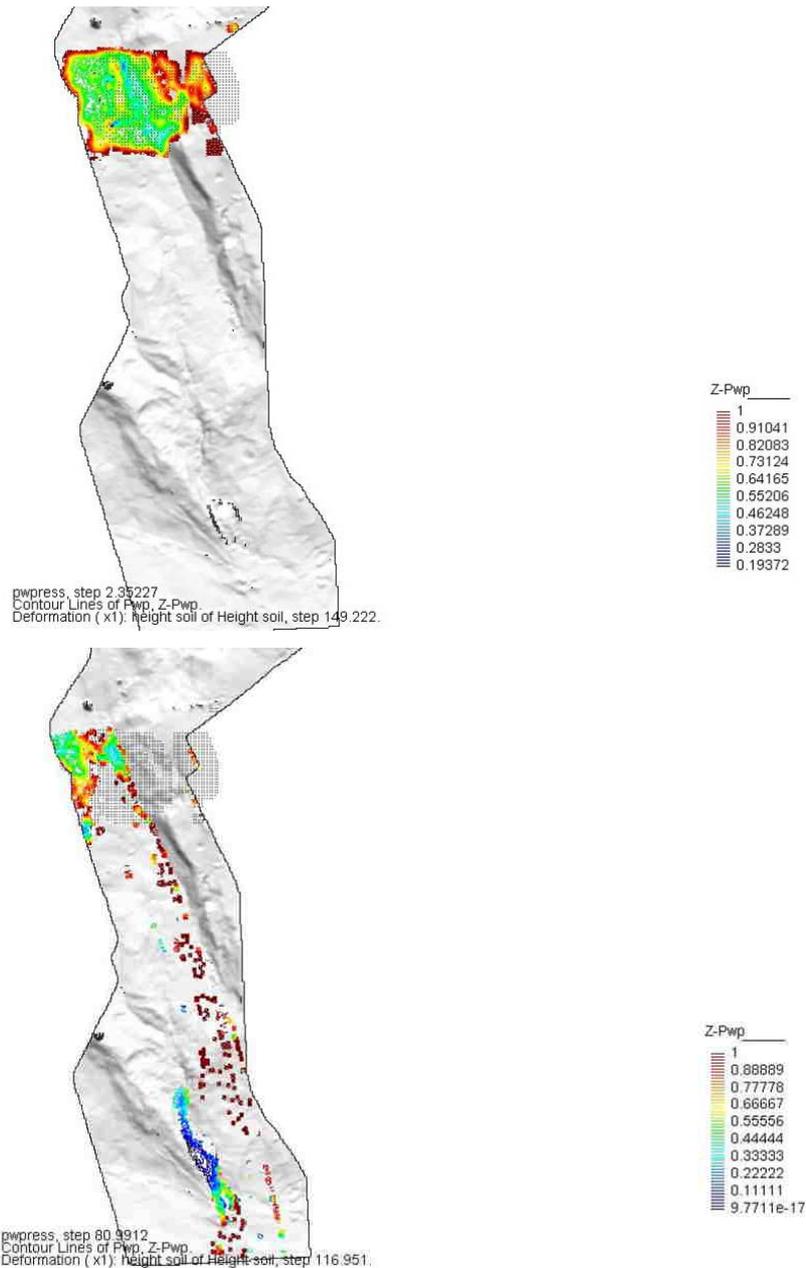


Figura 10. Fase di propagazione 2: (a) Distribuzione delle sovrappressioni interstiziali nel corpo di frana nelle condizioni iniziali (a) e nelle condizioni finali (b).

## 5. Sviluppi di ricerca previsti

Nella simulazione numerica fin qui condotta è stata data priorità all'analisi della propagazione in senso spaziale della colata di terra, provando a verificare mediante analisi a ritroso il meccanismo "motore" del processo, che qui è stato identificato nello sviluppo di elevate sovrappressioni interstiziali nella massa di terreno instabile ed alla relativa dissipazione nel tempo durante il processo di successiva propagazione. Si riconosce



tuttavia la necessità di includere il fattore “tempo” nelle stesse simulazioni, che invece nelle analisi fin qui condotte non è stato al momento contemplato, mediante l’uso di un modello viscoso che includa sia la componente attritivo-consolidante che la componente di resistenza viscosa vera e propria. Il modello che consente l’accoppiamento delle due caratteristiche anzidette è il modello di Herschel-Bulkley, già implementato nel codice *Flow-SPH*, per cui si ritiene di condurre nuove analisi del processo qui descritto mediante l’applicazione del suddetto modello viscoso. In tale prospettiva, le caratteristiche viscoso del materiale verranno calibrate sulla base di un confronto con la tempistica effettivamente osservata per il fenomeno franoso durante la fase critica delle propagazione nel 2005 – 2006.

Inoltre, si precede di applicare il metodo descritto alla simulazione di processi di propagazione di altre frane con caratteristiche simili occorse nella regione appenninica italiana, al fine di verificarne la potenzialità effettiva in termini previsionali.

#### **Riferimenti bibliografici**

- Giordan D., Allasia P., Manconi A., Baldo M., Santangelo M., Cardinali M., Corazza A., Albanese V., Lollino G., Guzzetti F. (2013). Morphological and kinematic evolution of a large earthflow: The Montaguto landslide, southern Italy. *Geomorphology*, 187, 61-79.
- Hutter K. and Koch T. (1991). Motion of a granular avalanche in an exponentially curved chute: experiments and theoretical predictions. *Phil. Trans. R. Soc. London*, 334, 93 – 138.
- Laigle D. and Coussot P. (1997). Numerical modelling of mudflows. *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE*, 123 (7), 617 – 623.
- McDougall S. and Hungr O. (2004). A Model for the Analysis of Rapid Landslide Motion across Three-Dimensional Terrain. *Canadian Geotechnical Journal*, 41 (12), 1084 – 1097.
- Pastor M., Haddad B., Sorbino G., Cuomo S. & Drempetic V. (2009). A depth integrated coupled SPH model for flow-like landslides and related phenomena. *Int. J. Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 33, 143 – 172.
- Savage S.B. and Hutter K. (1991). The dynamics of avalanches of granular materials from initiation to runout. Part I: Analysis. *Acta Mechanica* 86, 201 – 223.