

# Valutazione della stabilità spondale di un tratto in forte erosione del fiume Vomano (TE) mediante analisi 3D alle differenze finite

Eugenia Cretella<sup>1</sup>, Giovanni Mataloni<sup>2</sup>, Antonio Pasculli<sup>3</sup>, Nicola Sciarra<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Chieti e Pescara, via dei Vestini 20, Chieti

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze, Storia dell'Architettura, Restauro e Rappresentazione, Università di Chieti e Pescara, Viale Pindaro 10, Pescara

<sup>3,4</sup>Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio, Università di Chieti e Pescara, via dei Vestini 20, Chieti: e-mail: nsciarra@unich.it

*Banking stability evaluation along the Vomano river (Teramo – central Italy), by 3D numerical modelling*

**ABSTRACT:** This job deal with the banking system evolution along the Vomano river (Teramo province in Abruzzo Region). Due to river deepening the riverbed is characterized from banking instability. Embankments, nearly vertical, with over ten meters high escarpment, are withdrawing constantly due to the decreasing of clay borders caused by stream. The focused area is composed by a clay substratum highly engraved appearing along the main part of the river, and from alluvial cover. Morphology is continuously modified. In order to get the right assessment of the present situation a topographic survey has been realized by the use of GPS (Global Positioning System) a powerful tool which permits quick surveys, high performances and working simplicity. The survey has been realized using the equipment Trimble Total Station 5700, on mode RTK, which guaranteed an appropriate precision for the riverbeds. The obtained data, bearing the topographic area, has been elaborated according several software concerning the construction of geometric model. Physical-mechanical feature of lithotypes obtained from lab analysis, have been used to get physic model. This model has been finally discretized in order to figure out the correct value of the volume involved in the embankment instability. Furthermore, to achieve the purpose to analyse the cinematic evolution was employed a three dimensional finite difference numerical code.

*Key terms:* GPS, banking instability, 3D modelling, Abruzzi region

*Termini chiave:* GPS, instabilità spondale, modellazione numerica, regione Abruzzo

## Riassunto

Questo lavoro riassume lo studio effettuato al fine di analizzare l'evoluzione del sistema spondale lungo un tratto del fiume Vomano in provincia di Teramo (Abruzzo). L'alveo fluviale presenta vistosi fenomeni di instabilità spondale dovuti al forte approfondimento dell'asta. Le sponde pressoché verticali, con scarpate anche decametriche, sono in continuo arretramento per lo scalzamento al piede esercitato dal decorso fluviale. L'area investigata si presenta geologicamente costituita da un substrato argilloso fortemente inciso, affiorante lungo buona parte dell'asta fluviale, e da una copertura alluvionale, rimasta pensile rispetto all'attuale corso d'acqua, costituita da terrazzi ghiaioso limosi. Il sito presenta una morfologia in continua evoluzione; per una corretta valutazione dello stato attuale è stato realizzato un rilievo topografico tramite l'utilizzo di un sistema satellitare GPS (Global Positioning System), un moderno strumento utile soprattutto per la rapidità del rilievo, per le elevate prestazioni e per la semplicità dei metodi. I dati ottenuti, caratterizzanti la superficie topografica, sono stati elaborati mediante differenti software per la ricostruzione del modello geometrico. Le caratteristiche fisico-meccaniche dei litotipi

coinvolti, ottenute da prove di laboratorio, sono state utilizzate per la parametrizzazione del modello fisico. Questo è stato successivamente discretizzato al fine di pervenire ad una corretta valutazione dei volumi coinvolti nella instabilità spondale. Infine, per studiare l'evoluzione cinematica dell'area, il modello ottenuto è stato analizzato mediante il codice di calcolo tridimensionale alle differenze finite (FLAC3D).

## 1. Introduzione

L'area oggetto di studio è ubicata nella porzione settentrionale della Regione Abruzzo, in particolare il Fiume Vomano attraversa gran parte della provincia di Teramo e marginalmente quella de l'Aquila (Foto 1).

L'interesse per il Fiume Vomano nasce dalla natura complessa e dall'intreccio di cause e effetti che hanno innescato intensi fenomeni erosivi in un tratto d'alveo esteso oltre i 14 km. Risalendo il corso del fiume l'entità dell'escavazione dell'alveo diviene sempre più accentuata; il dissesto raggiunge verso la costa il ponte autostradale A14 (Foto 2), mettendo a giorno gli spiccati di fondazione, mentre verso l'interno supera di circa 1.5 km il ponte di Castelnuovo.



FOTO 2. Panoramica dell'area oggetto di studio. Tra le due linee continue si sviluppa l'area modellata tramite il FLAC\_3D, la linea tratteggiata individua la sezione analizzata con FLAC\_2D

*Panoramic view of observed area. Between the continuous lines reach out the modelled area by FLAC\_3D, the shaded line localizes the modelled section by FLAC\_2D*

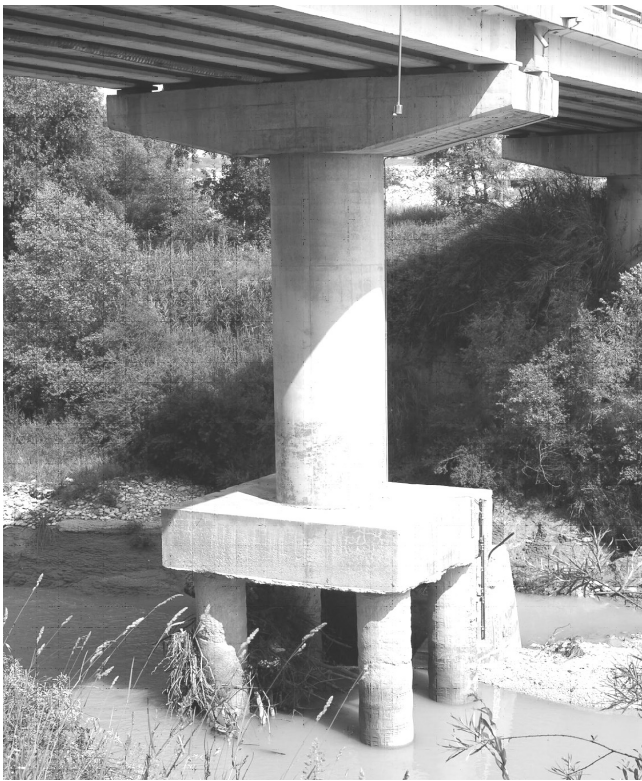


FOTO 1. Fondazioni su pali scalzate in prossimità del ponte per Atri (TE)

*Erosion of pile foundation near the bridge to Atri (TE)*

Il fiume Vomano nasce dalla dorsale carbonatica del Gran Sasso ed attraversa, in direzione ovest est, l'intero settore collinare pedemontano costituito dai sedimenti depositi entro il *bacino della Laga* fino a confluire nell'Adriatico poco a sud dell'abitato di Roseto degli

Abruzzi.

La Val Vomano è caratterizzata dalla presenza di un substrato geologico costituito da sedimenti di ambiente marino a tessitura fine, appartenenti alla Formazione delle Argille marnose grigio-azzurre. La mancanza di apporti detritici, a causa dei numerosi sbarramenti, ha provocato uno squilibrio nel regime idraulico fluviale e, insieme anche all'energia acquisita dai rilasci da parte di Enti Pubblici, ha aumentato notevolmente il potere erosivo del corso d'acqua mettendo a nudo e, in seguito, incidendo profondamente e irreversibilmente il substrato argilloso.

Una delle conseguenze dell'incisione dell'alveo è stata l'incremento d'altezza e della ripidezza delle sponde; rese più facilmente soggette a fenomeni d'instabilità anche da parte delle piene, queste ultime incrementano l'erosione laterale aggravando e danneggiando le opere di attraversamento e di difesa idraulica presenti nel tratto d'alveo in disfacimento.

La situazione morfologica così compromessa danneggia l'intero sistema idrico ad esso connesso: i collettori secondari risentono a partire dalla confluenza l'effetto della variazione del livello di base locale, innescando anch'essi fenomeni erosivi affini; la falda idrica presente nel fondovalle alluvionale subisce il drenaggio inevitabile verso il profondo solco fluviale; le sponde soggette ad un'intensa azione di demolizione hanno prodotto danni ingenti alle infrastrutture esistenti (1980, crollo del ponte per Atri; 1991, crollo della briglia di Castelnuovo).

In tale contesto è stato necessario compiere operazioni di misura sulle sezioni idrauliche più significative, ovvero su una porzione di terreno che si sviluppa trasversalmente al corso d'acqua al fine di stabilire e prevedere la possibile evoluzione dello stato morfologico del fiume.

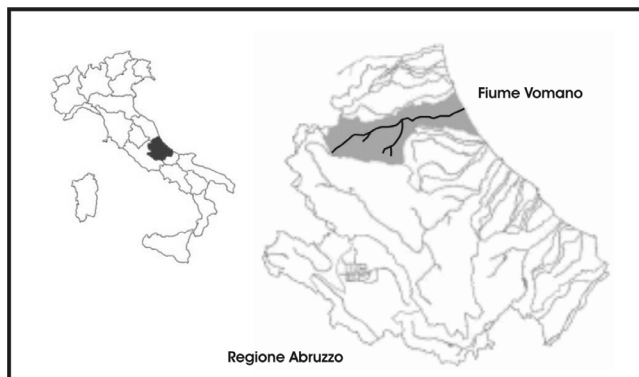


Figura 1 – Inquadramento geografico dell’area  
*Geographical setting of the surveyed area*

## 2. Aspetto geologico-strutturale

La zona in esame rientra nel dominio di pertinenza della successione sedimentaria del bacino marchigiano-abruzzese, in particolare le sorgenti del Fiume Vomano si originano dalle formazioni carbonatiche e dolomitiche meso-cenozoiche appartenenti all’arco del Gran Sasso. La porzione occidentale del bacino idrografico coincide con il settore collinare pedemontano costituito da sedimenti deposti entro il *bacino della Laga*, l’avanfossa più interna e antica del dominio marchigiano-abruzzese esterno.

Limitatamente al settore orientale, al di sopra della Formazione della Laga, le *Marne del Vomano* (Centamore *et alii*, 1990) affiorano in un’ampia sinclinale sulla sponda sinistra del fiume e, insieme ai Conglomerati di Rigopiano, rappresentano i depositi di bacino satellite dell’Unità della Laga nel Pliocene basale. Le marne del Vomano sono costituite da marne argillose e siltose cui si intercalano sottili livelli pelitico-arenacei. Nella parte superiore della formazione si rinvencono orizzonti arenaceo-pelitici e pelitico-arenacei a carattere torbiditico.

Il Fiume Vomano, nel suo percorso verso l’Adriatico, attraversa l’avanfossa pliocenica rappresentata dal *bacino del Cellino* (Centamore *et alii*, 1992) e il bacino satellite plio-pleistocenico rappresentato dalla *Formazione di Mutignano*.

L’Unità del Cellino, costituita dai depositi torbiditici della *Formazione Cellino* (Pliocene inferiore), è formata da una sequenza basale di argille marnose e torbiditi siltose fini, alle quali è intercalato un livello conglomeratico poligenico. Superiormente si rinviene una sequenza torbiditica a carattere prevalentemente arenitico alla base e pelitico, con rare intercalazioni arenacee, al tetto (Casnedi, 1991).

Nella fascia periadriatica è presente una successione marina plio-pleistocenica prevalentemente pelitica in cui è stata riconosciuta una lacuna stratigrafica di entità variabile riferibile soprattutto al Pliocene medio (Crescenti, 1971). Tale successione è limitata al tetto da una superficie erosiva su cui poggia una sequenza formata da sabbie e ghiaie che costituiscono i depositi di chiusura della *Formazione di*

*Mutignano*. Questa formazione rappresenta il ciclo sedimentario del Pliocene superiore-Quaternario ed è costituita da argille grigio azzurre con rari livelli sabbiosi.

L’area più esterna del bacino idrografico incide due dorsali longitudinali dovute alla presenza di due sovrascorrimenti (Casnedi, 1986; Centamore *et alii*, 1992) rispettivamente di Bellante-Cellino, la più interna, e la Struttura Costiera (Ori *et alii*, 1991) anche detta di Campomare-Montesilvano.

## 3. Caratteristiche litostratigrafiche

Le peculiarità litostratigrafiche sono state individuate tramite un rilevamento geologico di dettaglio e sulla base di sondaggi geognostici eseguiti nell’area di studio. In prossimità dell’area di più stretto interesse, poco a valle del ponte per Atri, sono riconoscibili le seguenti unità:

- a) Basamento pliocenico costituito da argille marnose grigio azzurre (Pliocene medio-superiore);
- b) Coperture quaternarie costituite da depositi alluvionali antichi e recenti terrazzati (Pleistocene medio-superiore) e da depositi alluvionali attuali (Olocene).

### 3.1 Argille marnose grigio-azzurre (Pliocene medio-superiore)

La formazione delle Argille marnose grigio-azzurre costituisce il substrato su cui posano i depositi alluvionali antichi e recenti terrazzati ed i depositi alluvionali attuali che colmano il fondovalle.

Tale substrato è costituito da materiali a grana finissima (limi con argilla di colore grigio) ben stratificati, in strati decimetrici. All’interno degli strati sono presenti sottilissime intercalazioni di sabbia a grana fina, distribuite parallelamente alla stratificazione, a volte organizzate a plaghe ondulate entro gli strati. La porzione superficiale della formazione si presenta fortemente alterata nelle zone d’alveo a causa di cicli di imbibizione ed essiccazione dovuti al transito giornaliero di piene artificiali. Queste favoriscono l’asportazione dei livelli ammorbiditi sia lungo il greto fluviale sia al piede delle sponde, generando un solco d’erosione sempre più marcato.

### 3.2 Depositati alluvionali antichi e recenti terrazzati (Pleistocene medio-superiore)

I depositi sono costituiti approssimativamente da un livello metrico basale di ghiaie, e da sedimenti argilloso-siltosi di tracimazione nella porzione sommitale, quest’ultimi sono stati sottoposti nel tempo ad una più o meno marcata pedogenesi. In coincidenza degli sbocchi di valli laterali si fanno più abbondanti le porzioni sabbiose e limose derivate dal rimaneggiamento di coltri colluviali che in parte ancora occupano la parte bassa dei versanti e l’asse delle valli minori.

Il deposito alluvionale antico (Pleistocene – Olocene) è costituito da elementi arrotondati e di grande pezzatura di origine calcarea a volte cementati, più spesso contenenti una matrice argilloso-limosa; questi depositi si trovano ad

un'altezza di circa 30 m rispetto all'alveo attuale e sono costituiti da due ordini di terrazzi.

Il deposito alluvionale recente (Olocene) è costituito da ghiaie, sabbie e limi. Questo terrazzo, alto circa 10 m rispetto al corso d'acqua, si estende per buona parte del fondovalle, sia in destra sia in sinistra idrografica. Similmente ai depositi antichi, la porzione superiore è costituita da sedimenti di trascinamento (limi e limi sabbiosi) che poggiano su ghiaie e sabbie a cui si intercalano livelli e lenti discontinue d'argilla limosa. Il terrazzo, per la sua posizione e per le sue caratteristiche di permeabilità, è sede della falda idrica del Fondovalle, almeno per quei tratti in cui l'incisione fluviale lo permette.

### 3.3 Depositi alluvionali attuali (Olocene)

Il deposito attuale, incassato nel precedente, si trova ad un'altezza variabile tra tre e quattro metri sulla zona d'alveo e si sviluppa per alcune centinaia di metri. È costituito da ghiaie e ciottoli prevalentemente calcarei contenenti una matrice sabbioso-limosa.

In esso sono inclusi anche i depositi presenti sulla piana golenale e sul fondo dell'alveo, separati in alcuni tratti da argini molto elevati. In questi depositi è possibile riscontrare la presenza di alcuni massi dalle dimensioni variabili fino al metro, probabilmente sottratti alla vecchia golena dalle acque fluviali. I ciottoli e le ghiaie trasportati dalla corrente si accumulano in barre longitudinali, secondo la direzione della corrente, nei luoghi in cui diminuisce l'energia fluviale. Questi corpi sedimentari che possono migrare, distruggersi e riformarsi sono degli elementi vitali ed insostituibili per la dinamica dell'alveo.

## 4. Ricostruzione del modello geometrico e fisico

Particolare attenzione è stata posta nella ricostruzione del modello tridimensionale della zona d'alveo investigata.

L'elevata dinamicità morfologica del sito in esame ha reso necessario predisporre una campagna di rilievi topografici specifica, in quanto i supporti cartografici esistenti (carta topografica, scala 1:5000, 1989) non risultavano adeguatamente aggiornati per una corretta analisi della stabilità a causa della singolare velocità ed entità dell'approfondimento dell'alveo.

Il rilievo topografico è stato realizzato tramite l'utilizzo di un sistema satellitare GPS (Global Position System), un potente strumento per molte applicazioni, con strumentazione Trimble Total Station 5700, che consente una precisione centimetrica nelle misure. È stata predisposta una rete di inquadramento topografico in cui sono stati scelti punti di appoggio sia in destra sia in sinistra idrografica del fiume, ubicati in zone adeguatamente distanti dagli argini soggetti ad erosione, tali quindi da ritenersi stabili. L'allestimento della struttura topografica consente di calibrare il sito nelle successive fasi di rilievo, rendendo la rete flessibile anche per eventuali integrazioni con strumenti di rilievo classico (stazioni totali). I dati sono stati acquisiti in RTK (Real-time kinematic), attraverso

rilievi in continuo e misure puntuali. L'utilizzo di questa metodologia ha consentito di aggiungere alle informazioni di carattere topografico anche informazioni inerenti le geometrie geologiche affioranti nell'area direttamente in fase di acquisizione, potenziando e valorizzando la qualità dell'analisi.

Il rilievo topografico realizzato con sistema GPS (Fig.2), ha permesso di generare un accurato modello digitale del terreno (DTM- Digital Terrain Model), costituito da una matrice di punti georeferenziati predisposti per la rappresentazione e l'analisi morfologica del territorio.

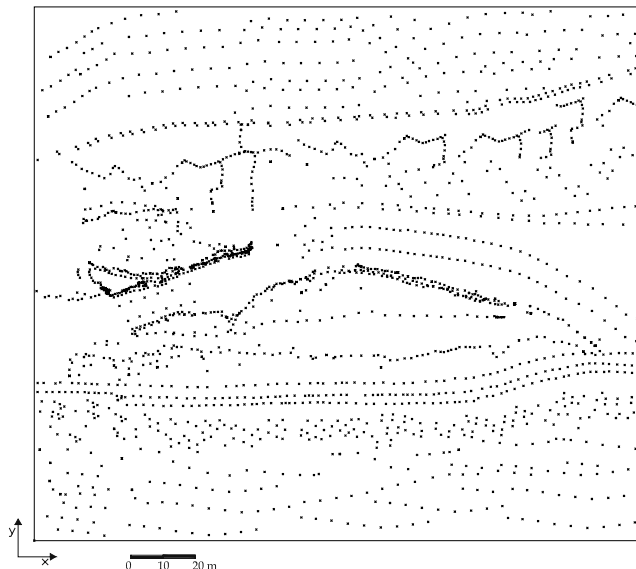


Figura 2. Distribuzione delle misure realizzate con il GPS (Autocad 3D)

*Distribution of topographic measures obtained by the use of GPS*

Inoltre, tale restituzione grafica è stata ulteriormente rafforzata e completata dall'utilizzo di una metodologia integrativa indiretta: la fotogrammetria digitale terrestre. Sono state realizzate mediante apparecchi fotografici ad elevata risoluzione immagini digitali in modalità di ripresa stereoscopica (Fig. 3). Queste sono state referenziate tramite la definizione di molteplici punti di appoggio fotogrammetrici misurati in coordinate spaziali direttamente in fase di acquisizione con il GPS. Il restitutore digitale, costituito da software, permette di ricavare la posizione spaziale di tutti i punti di interesse utilizzando le prospettive fotografiche centrali mediante osservazione stereoscopica. I dati ottenuti possono essere di tipo puntuale, lineare ed areale ed esportabili in formato CAD.

Questa metodologia di rilievo è stata utilizzata a sostegno ed integrazione del rilievo diretto effettuato con il GPS in modo tale da garantire una congruente e completa copertura delle misure, in special modo nelle aree non direttamente accessibili, ad esempio quelle coperte da fitta vegetazione che ostacolano le misure satellitari. Infatti, la fotogrammetria digitale terrestre possiede il vantaggio di

fornire informazioni istantanee anche di carattere non metrico (fotointerpretazione) sul sito in esame, senza necessità di accesso diretto al luogo, rilevando una grande quantità di punti. In questo studio tale metodologia è stata utilizzata in chiave geologica per la caratterizzazione geometrica del contatto erosivo tra il substrato argilloso e il sovrastante deposito alluvionale.

I dati ottenuti durante la campagna dei rilievi sono stati rielaborati mediante numerosi software di restituzione digitale della superficie topografica.

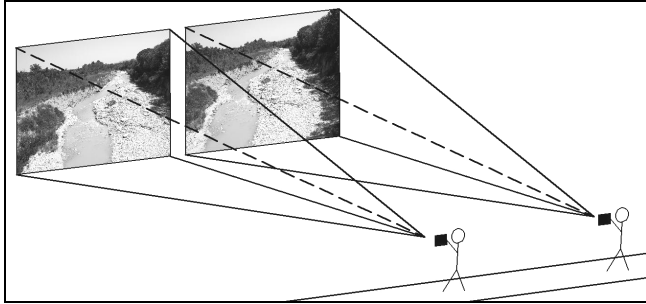


Figura 3. Modalità di ripresa stereoscopica dell'area di studio  
*Stereoscopic photography of studied area*

La fase rilevante del processo di ricostruzione DTM consiste nella scelta del metodo d'interpolazione. Nel caso in esame è stato scelto un programma (Surfer 8) dove le coordinate spaziali ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) di ogni singolo punto vengono utilizzate in un processo di interpolazione al Kriging, tale da generare una distribuzione omogenea delle quote, riducendo al minimo l'errore logistico dovuto alla fase di acquisizione (Fig. 4).

Il risultato ottenuto è una ricostruzione reale e dettagliata della morfologia e una ricollocazione spaziale della superficie topografica secondo una griglia stabilita. Questa operazione è stata realizzata sia per la superficie topografica sia per limiti stratigrafici delle unità litologiche, interpolati entrambi con maglie quadrate di 5 m.

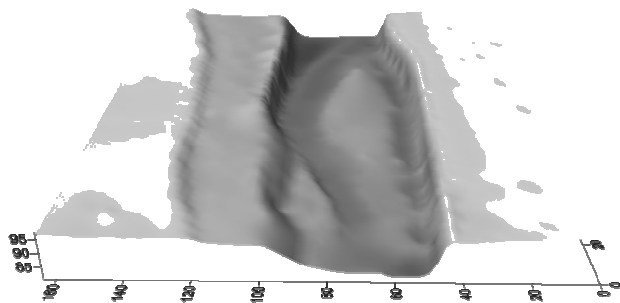


Figura 4. Ricostruzione della superficie topografica mediante il Surfer 8  
*Topographic surface reconstruction by Surfer 8*

Generate le superfici tridimensionali del DTM, sia

topografiche sia litologiche, queste sono state utilizzate per la valutazione dei volumi relativi ai litotipi coinvolti nell'instabilità spondale. A tal fine è stato impiegato il GID 7, software in grado di originare volumi e di discretizzarli secondo una mesh composta da elementi tetraedrici di maglia opportuna (Fig. 5).

Per ottimizzare la fase di discretizzazione sono state considerate in un'unica entità volumetrica il substrato argilloso e le coltri detritiche di alterazione presenti sul fondo d'alveo dovute allo smantellamento delle sponde, mentre i depositi alluvionali costituiscono l'unità sovrastante.

La geometria del modello, ricostruita tramite la griglia di discretizzazione, è stata importata all'interno di un codice di calcolo tridimensionale alle differenze finite, il FLAC\_3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua) per effettuare l'analisi numerica mirata a definire la stabilità del sistema spondale.

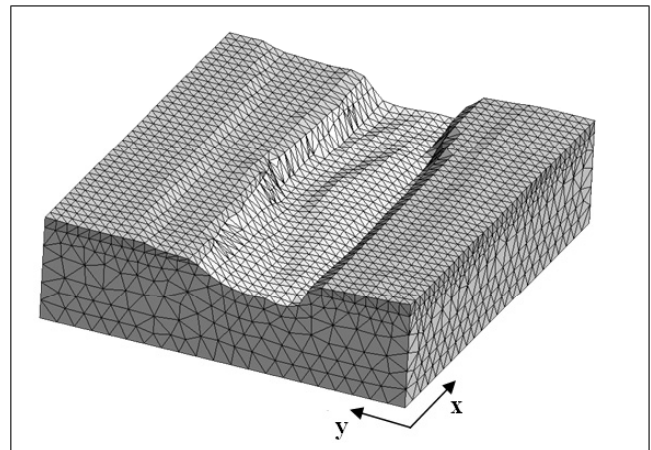


Figura 5. Griglia di discretizzazione realizzata  
*Generated discretized model*

## 5. Caratteristiche del modello numerico

L'utilizzo di una metodologia d'analisi numerica tridimensionale nasce dalla necessità di superare i metodi tradizionali e di analizzare globalmente e correttamente situazioni dinamiche complesse. Il FLAC\_3D è, infatti, un codice di calcolo numerico tridimensionale di analisi lagrangiana dei mezzi continui basato sul metodo delle differenze finite in grado di determinare lo stato tensionale e deformativo all'interno di strutture 3D.

La prima fase di studio consiste nel riprodurre le condizioni di stato iniziale del sistema, facendo attenzione a definire le condizioni al contorno, in modo tale da poter procedere successivamente all'analisi delle condizioni di non equilibrio. Il modello costitutivo adottato per questo studio è il modello plastico di Mohr-Coulomb. Questo modello prevede la caratterizzazione dei litotipi presenti secondo le proprietà fisico-meccaniche, quali la densità ( $\gamma$ ,  $\text{kN/m}^3$ ), l'angolo di attrito interno ( $\phi'$ , gradi), la coesione

( $c'$ , Pa), la resistenza a trazione ( $\sigma_t$ , Pa), il modulo di compressibilità volumetrica (K, Pa) e il modulo di elasticità tangenziale (G, Pa), questi ultimi funzione del modulo elastico e del coefficiente di Poisson (tab. 1). La caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali è stata ottenuta da numerose prove di laboratorio. In particolare sono state eseguite prove di taglio residuo, misurando la

resistenza residua dei sedimenti limosi, da utilizzare nella modellazione numerica, da cui è risultato un valore di  $\phi_r'$  pari a 14°. L'area investigata in questo lavoro, estesa circa 31350 m<sup>2</sup>, è ubicata a valle del ponte per Atri, in una sezione sede di significative variazioni morfologiche d'alveo (Fig. 1).

TAB. 1 – Valori medi dei parametri fisico-meccanici utilizzati nella modellazione numerica  
*Geotechnical mean parameters used in the analyses*

| LITOTIPI             | $\gamma$<br>(KN/m <sup>3</sup> ) | K<br>(Pa) | G<br>(Pa) | $\phi_p'$<br>(°) | $\phi_r'$<br>(°) | $c'$<br>(Pa) | $\sigma_t$<br>(Pa) |
|----------------------|----------------------------------|-----------|-----------|------------------|------------------|--------------|--------------------|
| Depositi alluvionali | 19.00                            | 2.88E8    | 1.73E8    | 35               | -                | 0            | 14.02E2            |
| Substrato argilloso  | 20.60                            | 8.4E6     | 3.84E6    | 23               | 14               | 20E3         | 23.0E2             |

La geometria articolata del modello, il cospicuo numero di elementi nonché la diversa evoluzione cinematica riscontrabile durante le fasi di studio, ha consigliato di analizzare la stabilità distintamente per l'argine di sponda destra e per quello di sponda sinistra idrografica, mantenendo la medesima parametrizzazione geotecnica dei litotipi.

L'analisi di stabilità è stata strutturata secondo tre diverse fasi di studio del modello. La prima fase consiste nell'imprimere al modello caratteristiche di elasticità; ciò è possibile esagerando i parametri geotecnici del sistema (coesione e tensione) in modo tale da escludere possibili deformazioni plastiche ed azzerando, nella fase di calcolo successiva, gli eventuali spostamenti e velocità non reali degli elementi. Calibrato il modello in tali condizioni, stabilendo quindi un equilibrio globale, è stata svolta sul medesimo una seconda analisi, utilizzando parametri geotecnici reali di picco della coesione e della tensione. In entrambi i settori di sponda non sono stati riscontrati apprezzabili spostamenti, per cui tale esame è tendenzialmente a favore della stabilità.

L'ultima fase, avendo determinato le condizioni attuali del sistema spondale, è stata quindi volta all'analisi del modello in condizioni di resistenza residua. Sono state esaminate le risposte del modello sottoposto a valori decrescenti del parametro coesivo, fino a raggiungere un minimo teorico pari ad 1kPa, condizioni d'altro canto che si realizzano pienamente nei livelli interessati dall'aggressione fluviale. Infatti, il degrado delle caratteristiche fisico-meccaniche delle sponde deriva principalmente dai cicli di imbibizione ed essiccazione dovuti al transito di piene artificiali, che gradualmente rendono sempre più profonda la porzione di materiale alterato.

L'impiego del FLAC\_3D ha, quindi, consentito di ottenere una serie di informazioni inerenti il sistema esaminato che facilitano la comprensione dei cinematismi accaduti ed in atto, in funzione delle sue peculiarità geometriche fisiche e meccaniche.

Tali rappresentazioni grafiche hanno mostrato chiaramente come si localizzano, in entrambe le sponde e in particolare nelle zone al bordo delle scarpate, aree soggette a movimento dovute al forte indebolimento.

La distribuzione degli spostamenti dei nodi delle maglie, sia totali (figure 6a e 6b, rispettivamente sponda destra e sinistra) sia lungo l'asse z (figure 7a e 7b) è congruente con le aree attualmente caratterizzate da una forte acclività. I valori assoluti di tali spostamenti non sono da considerarsi effettivamente realizzabili in quanto il codice di calcolo, non raggiungendo l'equilibrio delle forze e quindi non verificandosi la convergenza dell'algoritmo, come accade nei sistemi stabili, continua nel calcolo numerico. È osservabile come sulle medesime zone soggette a movimento si collocano anche le massime deformazioni al taglio (figure 8a e 8b) raffigurate lungo una sezione significativa; queste possono essere interpretate anche come possibili zone di innesco di fratturazione.

Una ulteriore informazione può essere ricavata dalla rappresentazione degli indicatori di plasticità in cui è rappresentata la tipologia di sforzo che procura o che procurerebbe la rottura in quella particolare maglia: sono state così individuate maglie in regime elastico, in plasticizzazione raggiunta per taglio e per trazione. Significativa è la distribuzione longitudinale alla sommità delle scarpate di rottura per trazione (figure 9a e 9b). Infatti, questa tipologia di sforzo è stata verificata anche durante il rilievo di campagna; lungo gli orli di scarpata sono frequentemente riscontrabili fratture più o meno beanti, a volte prossime al crollo, in chiaro stato di deformazione. Le figure 10a e 10b mostrano l'andamento dei vettori di spostamento che meglio visualizzano il comportamento nelle zone più instabili.

Al fine di meglio interpretare e verificare i risultati ottenuti con la modellazione tridimensionale sono state studiate alcune sezioni anche in campo bidimensionale, utilizzando il modello plastico di Mohr-Coulomb e la medesima parametrizzazione geotecnica.

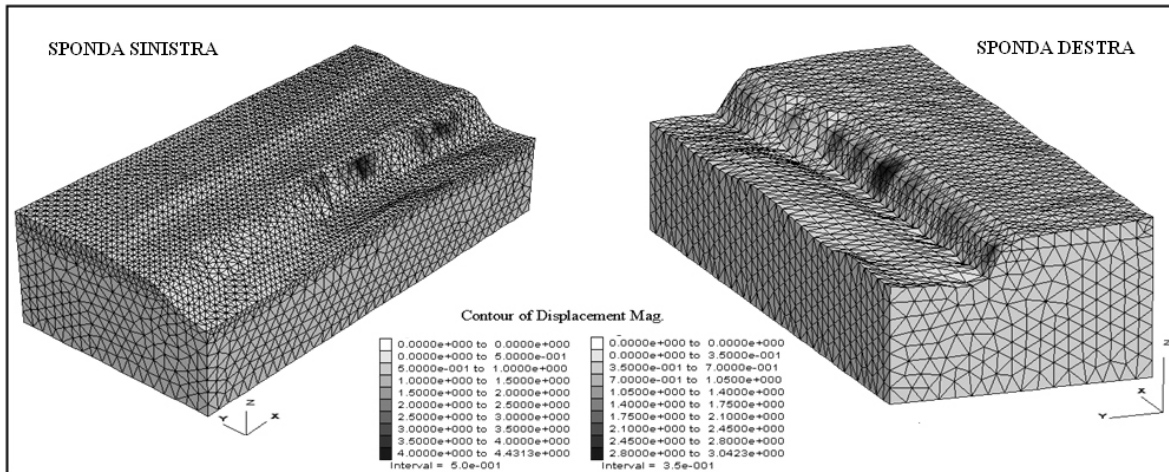


Figura 6. Distribuzione degli spostamenti totali  
*Distribution of total displacements*

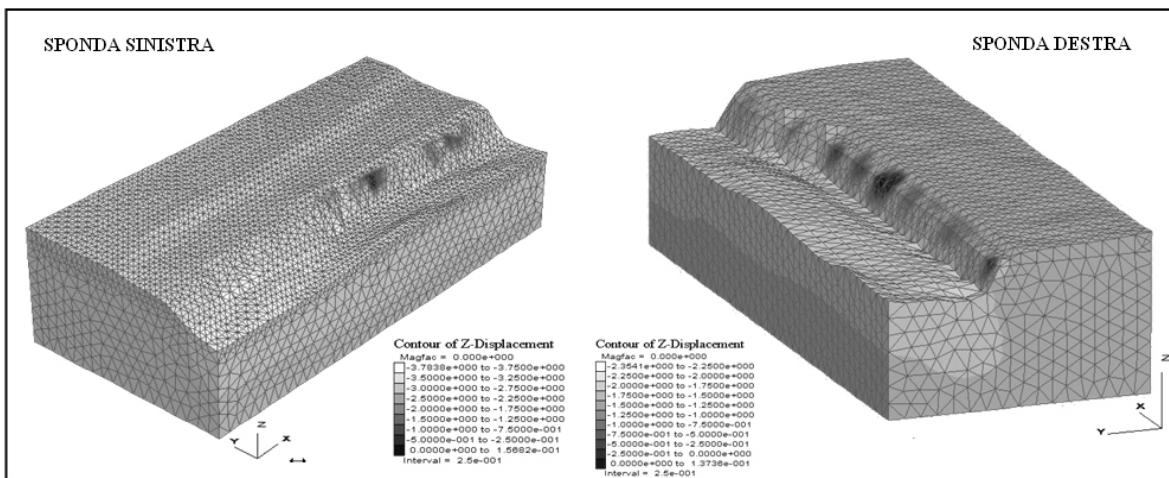


Figura 7. Spostamenti lungo l'asse z  
*Contour of vertical displacement*

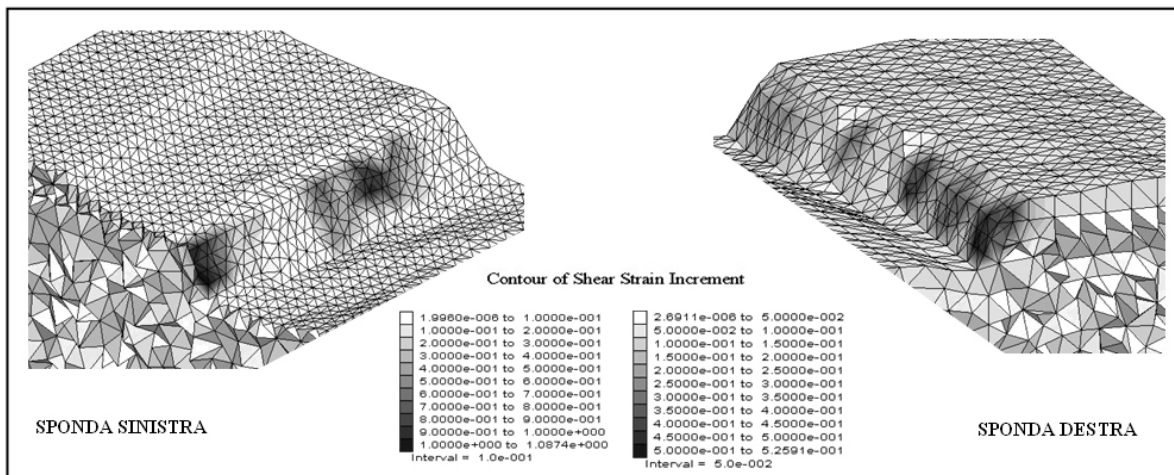


Figura 8. Distribuzione areale dei massimi shear strains  
*Max shear strain distribution*

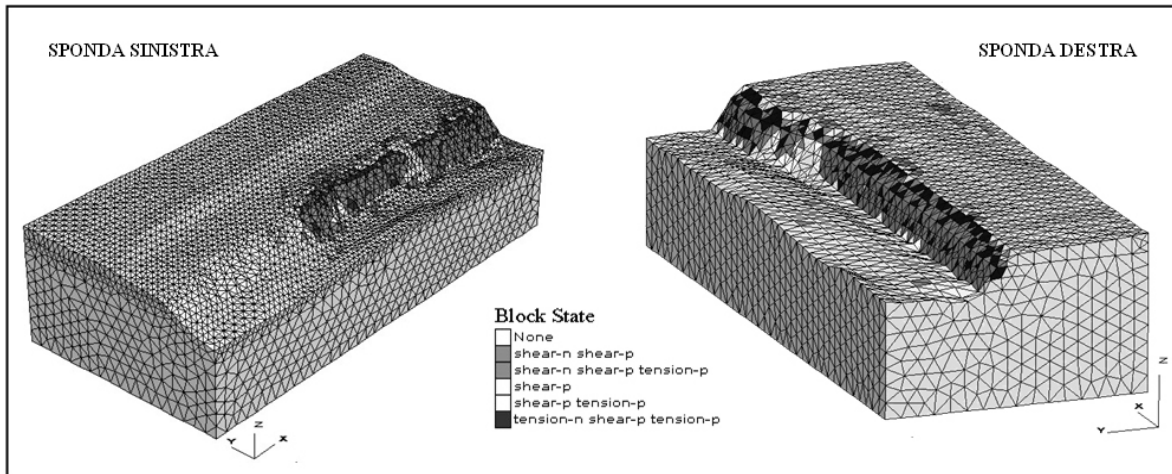


Figura 9. Distribuzione degli indicatori di plasticità  
*Plasticity indicators distribution*

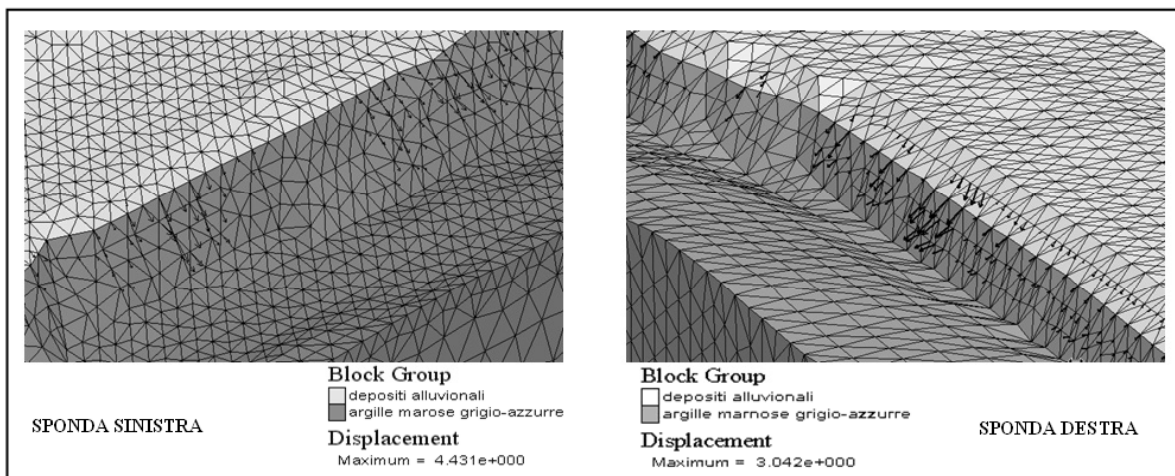


Figura 10. Distribuzione dei vettori spostamento  
*Distribution of displacement vectors*

L'analisi ha confermato i risultati ottenuti precedentemente. In queste sezioni sono maggiormente evidenziate le caratteristiche del modello spinto in condizioni di non equilibrio. Infatti, oltre alla rappresentazione degli spostamenti lungo gli assi x e y (figure 11 e 12), è facilmente osservabile come in tutte le sezioni si distribuiscano gli stati tensionali. Le massime deformazioni per taglio (Fig. 13) si allineano lungo la scarpata e si dispongono parallelamente tra loro, con pendenze di circa 70° - 80° rispetto l'orizzontale sulla sommità degli argini. Tale distribuzione è congruente con la dinamica morfologica verificatasi in questa sezione d'alveo: l'arretramento delle scarpate si sviluppa, infatti, lungo piani subverticali e paralleli tra loro.

Gli indicatori di plasticità (Fig. 14) mostrano all'interno della sezione le porzioni di terreno in possibile stato di plasticizzazione. Si può notare come tale stato non riguardi unicamente i settori prospicienti l'alveo, ma tale condizione

si risente a decine di metri di distanza, evidenziando la possibile attività del fenomeno nei settori retrostanti.

Il comportamento finale del modello è comprensibile osservando le deformazioni esagerate delle maglie (Fig. 15), in cui è evidente lo stato deformativo interno del sistema in condizioni limite. Infine, come mostrano i vettori spostamento (Fig. 16) sia nel 3D sia nel 2D, il movimento principale segue la massima pendenza delle sponde.

## 6. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato lo studio effettuato per l'analisi spondale del sistema fluviale Vomano (TE). Sono stati eseguiti rilievi topografici con GPS al fine di pervenire ad una conoscenza dettagliata della morfologia attuale, a causa dell'elevata dinamicità dell'area.

Il rilievo topografico con GPS e l'integrazione tramite fotogrammetria digitale si sono dimostrati strumenti di



acquisizione dei dati metrici e tematici affidabili e rapidi; sono, infatti, metodi qualificati per la definizione spaziale degli elementi del territorio in particolare per il monitoraggio nel tempo e nello spazio della cinematica

evolutiva del sistema spondale, anche nelle più minute modificazioni. Offrono inoltre la possibilità di istituire periodici e sistematici controlli ai fini della salvaguardia ambientale.

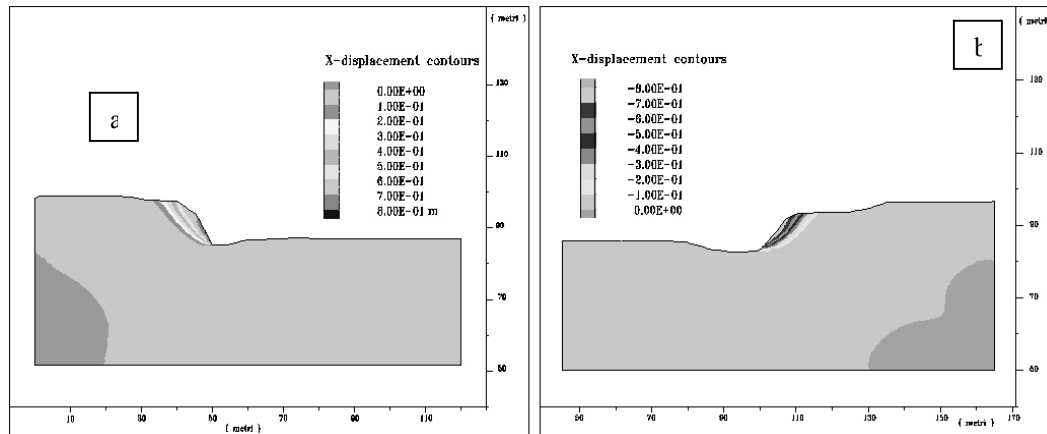


Figura 11. Spostamenti lungo l'asse x (a, sponda destra; b, sponda sinistra)

*Displacement along x axis (a, right bank; b, left bank)*

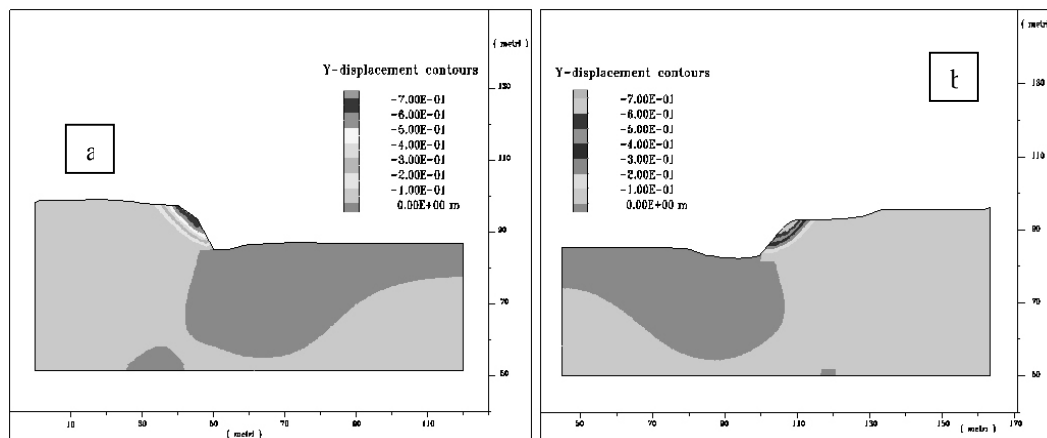


Figura 12. Spostamenti lungo l'asse y (a, sponda destra; b, sponda sinistra)

*Displacement along y axis (a, right bank; b, left bank)*

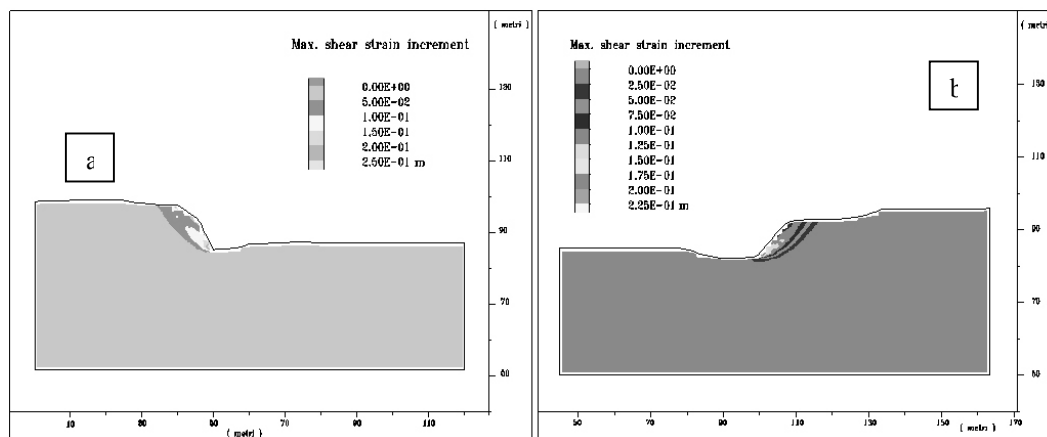


Figura 13. Distribuzione dei massimi shear strains (a, sponda destra; b, sponda sinistra)

*Max shear strain distribution (a, right bank; b, left bank)*

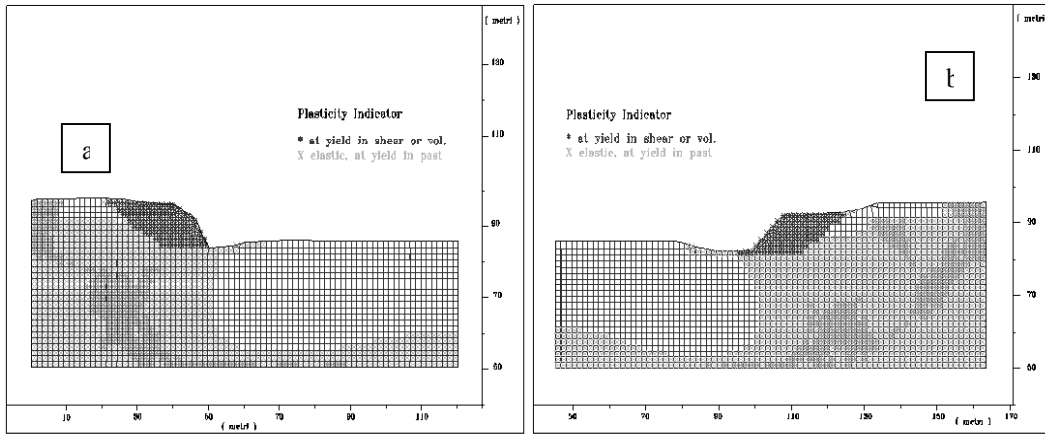


Figura 14 Distribuzione degli indicatori di plasticità (a, sponda destra; b, sponda sinistra)  
*Plasticity indicators distribution. (a, right bank; b, left bank)*

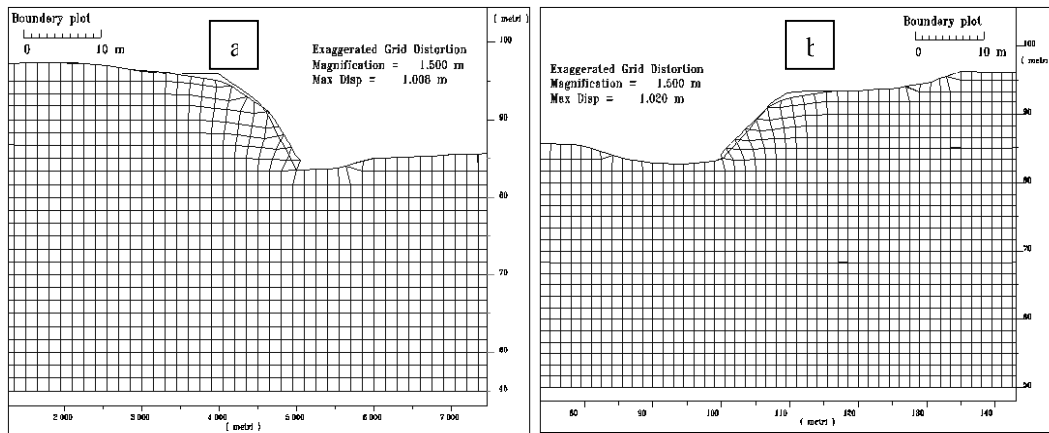


Figura 15 Griglie deformate (a, sponda destra; b, sponda sinistra)  
*Deformed meshes. (a, right bank; b, left bank)*

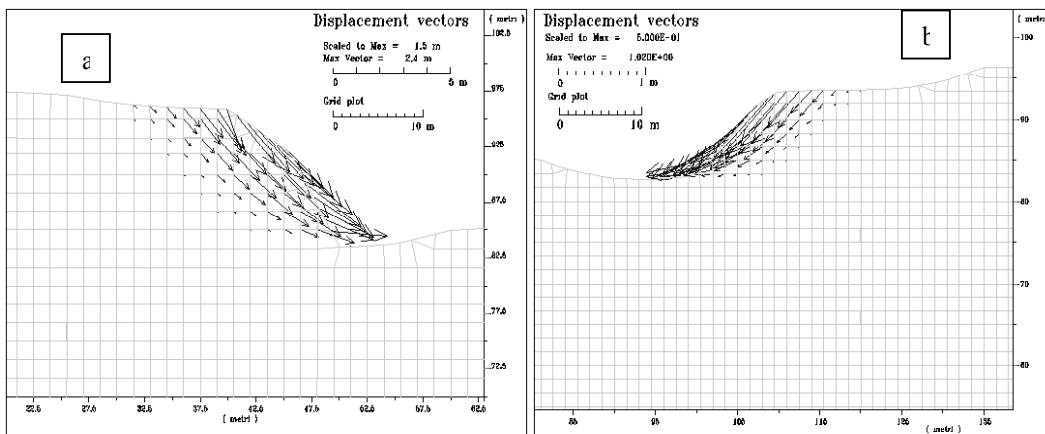


Figura 16 Distribuzione dei vettori spostamento (a, sponda destra; b, sponda sinistra)  
*Distribution of displacement vectors. (a, right bank; b, left bank)*

L'allestimento del modello geometrico tramite il Modello Digitale del Terreno è un elaborato grafico di notevole versatilità e consente un suo utilizzo in molteplici

chiavi d'indagine, anche oltre quelle prettamente geologiche.

L'analisi numerica tramite codice di calcolo

tridimensionale alle differenze finite (FLAC\_3D) del sistema spondale ha permesso di costruire un quadro chiaro e conforme con la realtà del meccanismo di rottura e delle deformazioni da esso prodotte. La stessa tipologia d'analisi è stata realizzata anche in ambiente bidimensionale (FLAC\_2D) lungo sezioni significative al fine di rafforzare e avvalorare i risultati ottenuti. Questi ultimi hanno mostrato un modello stabile in condizioni attuali, ma portando il sistema in condizioni di equilibrio limite con il raggiungimento delle resistenze residue si presentano zone

fortemente in crisi con un cinematismo che interessa mano mano porzioni di terreno retrostanti.

Le zone di probabile rottura, facilmente osservabili dalle isolinee di deformazione plastica e dalle griglie deformate, si distribuiscono in una posizione del tutto analoga a quella riscontrabile direttamente in situ. Gli spostamenti hanno mostrato una buona correlazione con quelli effettivamente verificatisi, evidenziando un movimento principale lungo la pendenza massima delle sponde, maggiormente accentuato lungo il bordo delle scarpate.

## Bibliografia

- Casnedi, R., 1986. Effetti della subsidenza sulla geometria dei corpi terrigeni nel Pliocene inferiore abruzzese - Mem. Soc. Geol. It., Pisa, 35, 157-162.
- Casnedi, R., 1991. L'avanfossa abruzzese fra i fiumi Vomano e Pescara nel Pliocene inferiore: rapporti fra sedimentazione e tettonica. Studi Geologici Camerti, vol. spec. CROP 11, 375-379.
- Centamore, E., Cantalamessa, G., Micarelli, A., Potetti, M. & Cristallini, C., 1990. I depositi terrigeni neogenici del Teramano (Abruzzo settentrionale). Riassunti Poster 75° Congresso Nazionale Soc. Geol. It., Milano 1990, 46-47.
- Centamore, E., Cantalamessa, G., Micarelli, A., 1992. Stratigrafia e analisi di facies dei depositi del Miocene e del Pliocene inferiore dell'avanfossa marchigiano-abruzzese e delle avanfosse limitrofe. Studi geologici Camerti, volume speciale, Tavola 1 ("Carta geologica dei bacini della Laga e del Cellino e dei rilievi carbonatici circostanti", scala 1:100000).
- Crescenti, U., 1971. Osservazioni sul Pliocene degli Abruzzi settentrionali: la trasgressione del Pliocene medio e superiore. Boll. Soc. Geol. It., 90, 3-21. Roma.
- FLAC\_3D, 2000. Fast Lagrangian Analysis of Continua. Version 4.0, Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota USA.
- Ori, G.G., Serafini, G., Visentin, C., Ricci Lucchi, F., Casnedi, R., Colalongo, M.L., Mosnia, S., 1991. The Pliocene-Pleistocene Adriatic Foredeep (Marche and Abruzzo, Italy): an integrated approach to surface and subsurface geology. 3rd E.A.P.G. Conference, May 1991, Adriatic Foredeep Field trip Guide book. 85 pp., 89 figg.