

## Recenti sviluppi nella modellazione dell'arretramento di sponde fluviali

Massimo Rinaldi<sup>1\*</sup>, Stefano Dapporto<sup>2</sup>, Laura Luppi<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Autore corrispondente: Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, via S.Marta 3, 50139 FIRENZE, tel.: 055 4796225, Fax: 055 495333, e-mail: mrinaldi@dicea.unifi.it.

<sup>2</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Firenze (attualmente Regione Toscana – Sistema Regionale di Protezione Civile), dapporto@geo.unifi.it

<sup>3</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile, Università di Firenze, laura.luppi@dicea.unifi.it.

### *Recent advances in modelling river bank retreat.*

**ABSTRACT:** This paper is focussed on the interaction between the two main groups of processes responsible for river bank retreat (fluvial erosion and mass failures), showing how an integrated analysis of the two processes allows for a more realistic reconstruction of the dynamics of bank retreat. A methodological framework adopted for modelling the processes interaction is described, and some results deriving from two study cases are reported. The first study case is a river bank of the Sieve River. Bank retreat occurred during a flow event is modelled by a combination of fluvial erosion, seepage and stability analysis. The second study case refers to a reach of the Cecina River: compared to the previous one, in this case a hydrodynamic simulation of the reach is performed in order to obtain a more accurate estimation of the near-bank shear stresses.

**Key terms:** Bank erosion, Bank retreat, Fluvial erosion, Mass failures

**Termini chiave:** Erosione di sponda, Arretramento di sponda, Erosione fluviale, Movimenti di massa

### **Riassunto:**

Questo lavoro si concentra sull'interazione tra i due principali gruppi di processi che determinano l'arretramento di sponde fluviali (erosione fluviale e movimenti di massa), mettendo in evidenza come una loro modellazione integrata permetta di ottenere una ricostruzione più realistica della dinamica del fenomeno e di ricavare risultati talora molto diversi rispetto all'analisi dei singoli processi. Dopo aver sinteticamente inquadrato le principali problematiche relative alla quantificazione dell'arretramento di sponde fluviali, viene descritta la procedura metodologica adottata per modellare l'interazione tra i due tipi di processi e vengono riportati sinteticamente alcuni risultati relativi all'applicazione di tale procedura a due casi di studio. Il primo caso di studio è rappresentato da una sponda del Fiume Sieve, per la quale viene modellato l'arretramento conseguente ad un evento di piena attraverso una combinazione di analisi dell'erosione fluviale, della filtrazione e della stabilità della sponda. Il secondo caso di studio si riferisce ad un tratto del Fiume Cecina per il quale, rispetto alla metodologia adottata nel caso precedente, viene effettuata una simulazione idrodinamica del tratto attraverso un modello CFD (*Computational Fluid Dynamics*) la quale permette di ricostruire in maniera più accurata le tensioni tangenziali lungo sponda.

### **Introduzione**

L'erosione di sponda è un processo chiave della dinamica

fluviale e presenta numerose conseguenze dal punto di vista fisico, ecologico e socio-economico. In particolare, studi recenti hanno evidenziato come il contributo dato dalle sponde alla produzione totale di sedimenti in un bacino può essere anche molto superiore di quanto si potesse ritenere (Walling et al., 1999). Naturalmente, numerose ricerche sono state dedicate durante gli ultimi decenni a questo argomento, a partire soprattutto dalle rassegne bibliografiche degli inizi anni '80 (in particolare Thorne, 1982) fino a quella più recente di Lawler et al. (1997). Una recente revisione bibliografica è quella di Rinaldi & Darby (2005), la quale riporta gli ultimi sviluppi nel campo della modellazione dell'erosione fluviale e dei movimenti di massa. In particolare, quest'ultima ricerca ha evidenziato che, seppure molti studi effettuati finora riconoscono che l'arretramento di una sponda è il prodotto dell'interazione di tre gruppi di processi (degradazione meteorica, erosione fluviale, movimenti di massa), essi tendono tuttavia a focalizzare l'attenzione su un singolo processo. Ciò rappresenta un limite rilevante in quanto le interazioni dinamiche e le retroazioni tra processi diversi possono portare ad effetti talora inattesi e non prevedibili a priori.

Il riconoscimento di questo problema non è nuovo: Lawler (1992) ha introdotto un modello concettuale che tenta di definire quale gruppo di processi è dominante rispetto agli altri muovendosi da monte verso valle in un ipotetico bacino di drenaggio, evidenziando che i vari processi non si manifestano isolatamente ma che agiscono

sempre, in una certa misura, in combinazione tra loro. In particolare, i processi subaerei (degradazione meteorica) sono generalmente significativi nelle porzioni montane del reticolo idrografico, mentre nelle zone medio - basse del bacino diventa preponderante l'interazione tra erosione fluviale e movimenti di massa.

Nonostante l'importanza dell'erosione fluviale come fattore di innesco dei movimenti di massa è ben nota, rimane di fatto la tendenza ad analizzare i due processi isolatamente, non consentendo una corretta quantificazione del contributo reciproco dei due processi. Questo articolo ha pertanto l'obiettivo di dimostrare come l'adozione di un approccio metodologico che consideri i due principali processi di arretramento come interagenti tra loro, piuttosto che trattandoli isolatamente, porti ad una ricostruzione più attendibile del fenomeno e ad una differente visione delle modalità stesse con cui le sponde contribuiscono all'alimentazione di sedimenti nel sistema fluviale.

## Metodologia

Come premesso, l'arretramento di una sponda fluviale coinvolge vari processi che agiscono in stretta combinazione tra loro. Nelle porzioni medio - basse del bacino, dove sono dominanti gli alvei alluvionali mobili, l'arretramento è generalmente guidato da una combinazione di forze idrauliche, legate all'azione della corrente fluviale, e movimenti di massa, dovuti all'azione della gravità. Non si esclude l'importanza dei processi subaerei, ma in questa concettualizzazione il loro ruolo può essere inquadrato come fattore che influenza le variazioni temporali dell'erosibilità dei sedimenti, cosicché il loro effetto può essere implicitamente tenuto in conto nei modelli di erosione. E' invece ben chiaro che, per una larga estensione dei tratti alluvionali mobili presenti nel bacino idrografico, i fattori idraulici e geotecnici sono entrambi importanti al punto che nessuno dei due può essere trascurato. Ciò è importante non solo nel senso che entrambi i processi devono essere quantificati, ma anche nel senso che è necessario tener conto della loro interazione reciproca. E' noto infatti che la modellazione di fenomeni che coinvolgono complesse retroazioni, non linearità ed interazioni dinamiche tra loro può risultare in comportamenti che non sarebbero altrimenti prevedibili senza considerare tali interazioni. I processi di arretramento di sponde fluviali possono essere inquadrati allo stesso modo: la modellazione delle interazioni tra processi idraulici e geotecnici può portare a previsioni con risultati sensibilmente differenti (in termini ad esempio di meccanismi e tempi di innesco dei singoli processi e di modalità con cui i sedimenti derivanti riforniscono il trasporto solido del fiume) rispetto al caso in cui questi processi vengono modellati isolatamente.

Mentre sono stati finora quasi del tutto assenti metodi quantitativi che esplicitamente tengano in conto delle interazioni tra erosione fluviale e movimenti di massa, sono

stati invece proposti alcuni modelli concettuali. In particolare, è utile richiamare il concetto di controllo del punto basale introdotto da Thorne (1982), il quale rappresenta uno schema concettuale per comprendere il controllo dei processi fluviali sull'arretramento di una sponda. Il concetto è basato sulla nozione che il tasso locale di arretramento di sponda è determinato dal bilancio di sedimenti al piede della sponda, definito attraverso tre stati possibili (rimozione non impedita, rimozione impedita, eccesso di capacità basale). Tale concetto è particolarmente utile per visualizzare e rimarcare alcuni aspetti, quali: (i) la stretta interazione che esiste tra processi sedimentari che operano sul fondo e sulle sponde; (ii) il tempo di residenza dei sedimenti temporaneamente immagazzinati al piede della sponda è considerato come un fattore critico nel controllare i tassi di arretramento di sponda nel medio termine.

Un altro aspetto importante di cui bisogna tener conto quando si vogliono quantificare i processi di erosione di una sponda fluviale è quello legato alla risoluzione temporale a cui generalmente si riferiscono le misure di arretramento. Queste ultime generalmente consistono nel determinare la posizione della sponda in tempi diversi e misurare le variazioni avvenute. Tuttavia, a causa di ovvi problemi logistici e per motivi di sicurezza, tali misure non vengono effettuate durante un evento di piena ma si riferiscono, nel migliore dei casi, alla situazione precedente ed immediatamente successiva all'evento. Vale a dire che la risoluzione temporale di cui generalmente si dispone è troppo ampia per cogliere alcuni aspetti chiave quali appunto le condizioni di innesco dei processi, i loro tassi e le interazioni reciproche. Esiste quindi la necessità di investigare le interazioni tra processi ad una risoluzione temporale con un'ampiezza inferiore a quella del singolo evento di piena per risolvere alcune questioni chiave per la comprensione del fenomeno. La modellazione numerica offre le potenzialità per investigare in questa scala temporale, a patto che vengano modellati tutti i processi ritenuti determinanti (flusso della corrente e conseguente erosione; pressioni interstiziali nella sponda e loro variazioni a seguito di processi di filtrazione; movimenti di massa) e soprattutto le loro interazioni reciproche.

Come anticipato precedentemente, sono quasi del tutto assenti in letteratura i tentativi di investigare la dinamica dell'arretramento di sponda combinando erosione fluviale, variazioni di pressioni interstiziali e stabilità della sponda attraverso un approccio integrato di modellazione. Uno dei pochi esempi è la modellazione di una sponda del Fiume Sieve presentata da Dapporto & Rinaldi (2003), utilizzando la procedura di analisi riassunta nel diagramma di flusso di Fig. 1. Esso può essere considerato come lo schema metodologico generale a cui sono riconducibili le due applicazioni riportate di seguito, la prima è appunto quella relativa alla sponda del F.Sieve e la seconda relativa ad una sponda del F.Cecina.

La procedura utilizzata è la seguente: (i) calcolare

l'entità dell'erosione fluviale e le conseguenti variazioni in geometria della sponda; (ii) determinare la distribuzione delle pressioni interstiziali attraverso un'analisi di filtrazione agli elementi finiti; (iii) calcolare il fattore di sicurezza della sponda attraverso il metodo dell'equilibrio limite. Questa sequenza è ripetuta per ogni passo temporale successivo, con la geometria della sponda che viene aggiornata in accordo all'arretramento calcolato attraverso erosione fluviale o movimenti di massa. Si dettagliano di seguito le procedure di calcolo utilizzate per ognuna delle precedenti fasi.

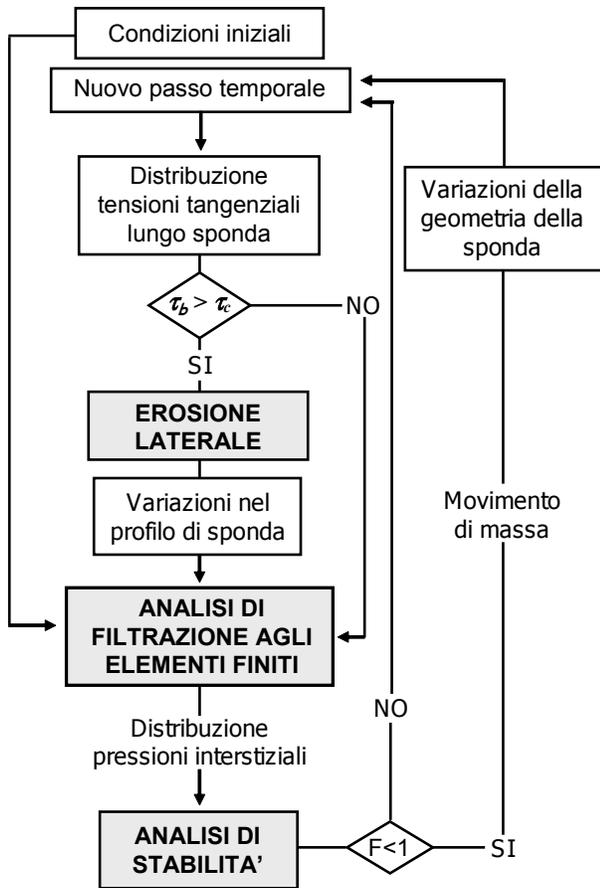


Figura 1 – Diagramma di flusso della procedura di calcolo usata per le simulazioni dell'arretramento di sponda.

*Flow chart showing the computational logic used for the coupled fluvial erosion-seepage-stability simulations.*

Per quanto riguarda l'erosione fluviale, è largamente accettato in letteratura che il tasso di arretramento di una sponda può essere quantificato in funzione dell'eccesso di tensione tangenziale, attraverso la formula (Partheniades, 1965):

$$\varepsilon = k_d (\tau - \tau_c)^a \quad (1)$$

dove  $\varepsilon$  (m/s) è il tasso di arretramento nell'unità di tempo,  $\tau$  (Pa) è la tensione tangenziale esercitata dalla corrente,  $k_d$  ( $\text{m}^2/\text{s}/\text{kg}$ ) e  $\tau_c$  (Pa) sono i parametri di erodibilità dei

sedimenti costituenti la sponda (coefficiente di erodibilità,  $k_d$ , e sforzo di taglio critico,  $\tau_c$ ) e  $a$  (adimensionale) è un coefficiente derivato empiricamente. È importante notare che, sebbene modelli di erosione di questo tipo sono largamente utilizzati diversi campi della geomorfologia, non esiste ancora una validazione formale di questa equazione. Pertanto rimangono alcune incertezze sul valore dell'esponente  $a$  (comunemente assunto pari ad 1 nella maggior parte degli studi che coinvolgono sedimenti coesivi, Partheniades, 1965), e sulle basi fisiche stesse dell'equazione.

Esistono inoltre notevoli incertezze nella determinazione dei parametri di erodibilità e studi recenti hanno messo a punto o impiegato specifiche strumentazioni per la misura in sito di tali parametri (per es. Hanson & Simon, 2001; Dapporto, 2001). Tuttavia, l'aspetto più critico per la quantificazione dell'erosione fluviale attraverso l'equazione (1) è rappresentato dalla difficoltà di misurare la tensione esercitata dal flusso sulla sponda, in particolar modo durante eventi di piena, che sono tipicamente quelli in cui si manifesta l'arretramento della sponda. Essendo la misura diretta pressoché impraticabile, la sola alternativa è quella di stimare le tensioni tangenziali attraverso modelli idraulici. Alcuni modelli sono stati sviluppati usando dati empirici ottenuti da esperimenti di laboratorio, ma essi vanno applicati con cautela a fiumi naturali dato che la forma del canale e delle sponde rappresentano una forte semplificazione della realtà. Oltre all'uso delle equazioni 1D tradizionalmente impiegate nell'idraulica, negli ultimi anni si sta sempre più affermando l'uso di modelli idrodinamici 3-D CFD (*Computational Fluid Dynamics*), i quali risolvono le equazioni di Navier-Stokes di una corrente a pelo libero, per una varietà di problemi ed applicazioni nei campi della meccanica dei fluidi e della geomorfologia.

### Applicazione ad una sponda del Fiume Sieve

La prima applicazione di cui si riportano i principali risultati è quella relativa ad una sponda del Fiume Sieve, sulla quale negli ultimi anni sono stati effettuate numerose ricerche in questo settore (si veda in particolare i precedenti lavori di Casagli et al., 1999, e Rinaldi et al., 2004, ai quali si rimanda per una dettagliata descrizione dell'area di studio e delle caratteristiche della sponda analizzata). Gli scopi di questa simulazione possono essere così riepilogati: (1) testare le potenzialità ed i limiti di questa forma di modellazione integrata; (2) quantificare il contributo ed il ruolo reciproco che i due principali processi (erosione, movimenti di massa) giocano nel controllare l'arretramento di sponda. La simulazione è stata effettuata per l'evento di piena del 19/11/1999, a seguito del quale è stata misurata una significativa erosione della sponda per gran parte del tratto monitorato. L'idrogramma dell'evento di piena, con una durata totale di circa 40 ore, è stato discretizzato in 25 passi temporali.

Per quanto riguarda la stima delle tensioni tangenziali finalizzata al calcolo dell'erosione, nel caso della sponda del Fiume Sieve si è adottata una procedura di calcolo semplificata. La tensione tangenziale media ( $\tau$ ) nella sezione è stata stimata come  $\tau = \gamma R S$ , dove  $\gamma$  = peso di volume dell'acqua,  $R$  = raggio idraulico ed  $S$  = cadente della linea dell'energia. Per trasformare questa tensione media in un valore di tensione lungo sponda più appropriato per modellare l'erosione, è stata utilizzata una distribuzione derivata da esperimenti condotti in laboratorio per canali rettangolari (Leutheusser, 1963). Questa rappresenta una semplificazione della reale distribuzione delle tensioni lungo sponda, ma è stata usata in questo studio soprattutto per verificare la possibilità di combinare tra loro i differenti processi. Una volta assegnati i parametri di erodibilità per i differenti materiali costituenti la sponda (sulla base di stime o di misure in sito) ed una volta ricavata, per un dato passo temporale dell'evento di piena, la distribuzione di tensione lungo la verticale della sponda, il profilo della stessa viene deformato secondo l'equazione (1).

L'analisi di filtrazione agli elementi finiti è stata effettuata discretizzando la sponda in circa 1600 elementi triangolari e quadrilateri, ed assegnando le funzioni di conducibilità idraulica e di contenuto d'acqua ai tre livelli di

materiale costituenti la sponda. Tale analisi veniva eseguita per ogni passo temporale ma, a differenza di studi precedenti, il profilo di sponda veniva deformato in accordo all'erosione fluviale calcolata. Questo ha richiesto una speciale attenzione per adattare gli elementi finiti alla nuova geometria della sponda alla fine di ogni passo temporale. Successivamente si usava il metodo dell'equilibrio limite per determinare il fattore di sicurezza (per i meccanismi di scivolamento e di rottura di masse aggettanti) alla fine di ogni passo temporale.

L'animazione grafica fornisce il modo migliore per visualizzare l'interazione tra i tre processi (erosione, filtrazione, stabilità) (si veda 'Simulation 2' alla pagina [http://www.dicea.unifi.it/massimo.rinaldi/private/simulation\\_s.htm](http://www.dicea.unifi.it/massimo.rinaldi/private/simulation_s.htm)). I principali risultati, in termini di quantificazione dei diversi processi, sono sintetizzati in Fig. 2. Essa evidenzia come l'erosione fluviale è un processo quasi continuo, attivo durante tutta la fase erosiva, mentre i movimenti di massa esibiscono un comportamento intermittente e discontinuo, con frequenti crolli di masse aggettanti prima e dopo il picco di piena, seguiti da uno scivolamento rotazionale durante la fase decrescente della piena.

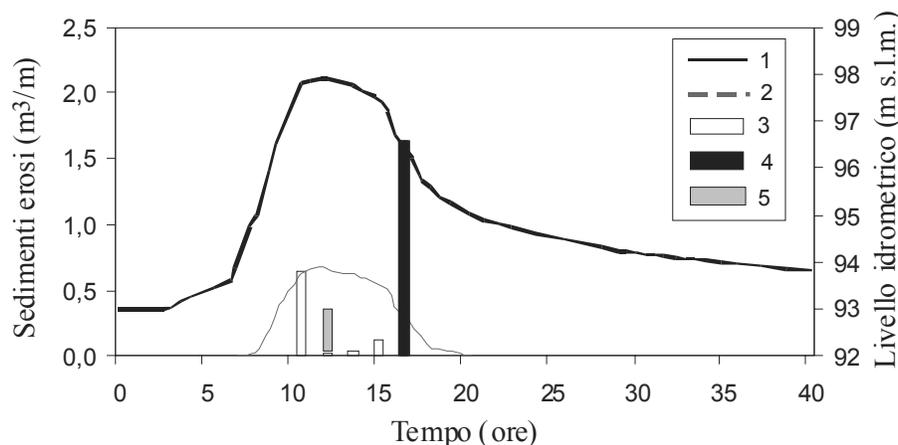


Figura 2 – Risultati della simulazione relativa alla sponda del Fiume Sieve: sedimenti prodotti dai diversi processi durante l'evento di piena del 19/11/1999 nei due scenari con e senza deformazione per erosione fluviale. 1: Livello idrometrico; 2: Erosione fluviale; 3: Rottura di masse aggettanti; 4: Scivolamento; 5: Rottura di masse aggettanti nello scenario senza erosione fluviale.

*Results of the simulation of the Sieve river bank: unit sediment volumes delivered by the different processes during the flow event of 19/11/1999 for the two scenarios with and without bank deformation by fluvial erosion. 1: Flow stage; 2: Fluvial erosion; 3: Cantilever failure; 4: Slide failure; 5: Cantilever failure in the scenario without fluvial erosion.*

Di particolare interesse è che i risultati di questa simulazione sono qualitativamente distinti da quanto aspettato da modelli concettuali esistenti di alimentazione di sedimenti che si basano su analisi a scala di evento. Infatti, studi precedenti hanno in genere indicato i movimenti di massa come il tipo di processo dominante, in particolar modo attraverso una rottura tipicamente occorrente durante la fase decrescente dell'idrogramma. Questa simulazione suggerisce piuttosto che i movimenti di massa si verificano come una serie di episodi erosivi, ad intervalli frequenti

durante l'evento, in conseguenza della progressiva erosione alla base della sponda. E' utile a tal fine confrontare questi risultati con quelli che si avrebbero per lo stesso evento nel caso in cui non si lascia deformare il profilo di sponda per erosione fluviale (Fig. 2). In questo secondo caso, si verificherebbe solo una singola rottura di massa aggettante (approssimativamente in corrispondenza del picco di piena), con un volume unitario di  $0.35 \text{ m}^2$  di sedimenti erosi e riforniti all'interno dell'alveo. Tale volume è molto inferiore a quello di  $11.65 \text{ m}^2$  previsto nello scenario in cui

la sponda viene deformata per erosione, di cui  $2.47 \text{ m}^3$  provenienti da movimenti di massa e  $9.18 \text{ m}^3$  da erosione fluviale. In altri termini, nello scenario con deformazione per erosione fluviale, i sedimenti derivanti da movimenti di massa sono 7 volte maggiori rispetto allo scenario senza erosione fluviale ed il volume totale è 33 volte maggiore. Queste differenze, seppure non del tutto sorprendenti ed in parte attese, evidenziano il modo in cui l'erosione fluviale innesca i movimenti di massa. Sono importanti anche le implicazioni nei confronti dei meccanismi di alimentazione del trasporto solido. L'effetto dell'erosione fluviale appare quello di favorire un'alimentazione di sedimenti provenienti da movimenti di massa anche durante le fasi intorno al picco di piena, in contrasto con la visione più consolidata in letteratura secondo la quale si verifica tipicamente una sola frana durante la fase discendente dell'idrogramma. Un'ulteriore implicazione è che, nonostante il volume di sedimenti derivanti dalla sponda sia molto più grande quando si considerano entrambi i processi, il tempo di residenza dei sedimenti alla base della sponda può essere molto più breve di quanto aspettato, dal momento che il materiale è immesso nel fiume durante le fasi prossime al picco di piena, quando le tensioni della corrente sono superiori, piuttosto che durante la fase discendente. Ne deriva che il controllo del punto basale di sponde per le quali esiste una forte interazione tra erosione fluviale e movimenti di massa può essere anche abbastanza distinto rispetto al modello concettuale classico proposto originariamente da Thorne (1982). Questa ipotesi richiede ovviamente ulteriori verifiche, ma potrebbe fornire una spiegazione al fatto che alcuni fiumi sono in grado di contribuire alla produzione totale di sedimenti in un bacino

molto più di quanto ci si potesse aspettare (Rinaldi & Darby, 2005).

### Applicazione ad una sponda del Fiume Cecina

Per provare a verificare l'ipotesi emersa a conclusione della precedente analisi, per investigare in che misura alcuni dei risultati ottenuti sono generalizzabili ad una maggiore varietà di situazioni, ed infine per perfezionare la metodologia di calcolo, più di recente è stato intrapreso un nuovo progetto di ricerca concentrato su due diversi casi di studio: Fiume Cecina (Italia Centrale) e Fiume Asker (Inghilterra meridionale) (Darby et al., 2004; Rossi Romanelli et al., 2004). Vale la pena richiamare la principale limitazione della precedente applicazione, che è rappresentata dal calcolo delle tensioni tangenziali lungo sponda. In questa nuova ricerca, la principale novità da un punto di vista metodologico è quella di impiegare tecniche di modellazione idrodinamica avanzate (CFD: *Computational Fluid Dynamics*) per ricostruire in maniera più accurata ed attendibile la distribuzione delle tensioni tangenziali in prossimità della sponda. Inoltre, altri ulteriori sviluppi rispetto al caso di studio precedente comprendono: (i) raffinamento della modellazione della filtrazione nella regione della sponda soggetta a deformazioni per erosione; (ii) considerare un più ampio spettro di eventi di piena.

I due siti di studio sono stati scelti in modo da rappresentare due situazioni variabili da sponde molto attive (tasso di arretramento dell'ordine dei  $5 \text{ m/anno}$  per il F.Cecina) a sponde molto meno attive (tasso di erosione dell'ordine di  $0.2 \text{ m/anno}$  per il F.Asker).

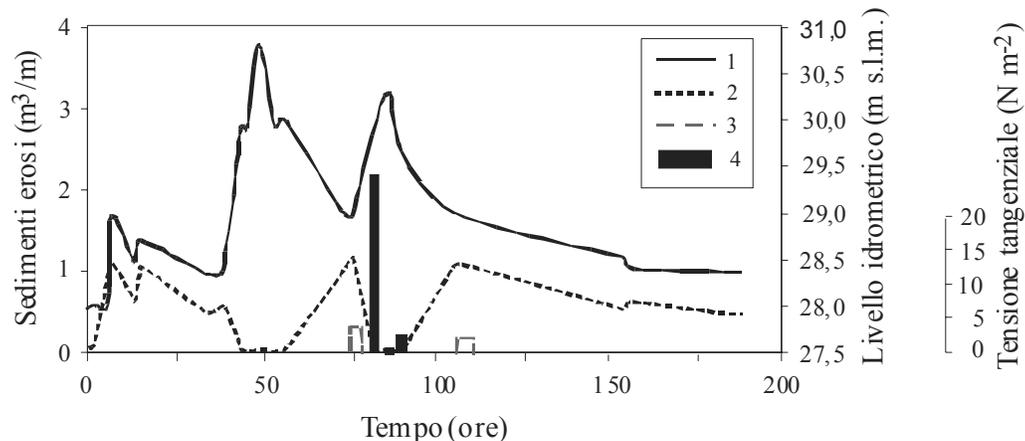


Figura 3 – Risultati della simulazione relativa alla sponda del Fiume Cecina per l'evento di piena dal 26/11 al 2/12/2003: andamento delle tensioni tangenziali calcolate con DELFT3D e contributo dei diversi processi. 1: Livello idrometrico; 2: Tensione tangenziale lungo sponda; 3: Erosione fluviale; 4: Scivolamento.

*Results of the simulation of the Cecina river bank for the flow event of 26/11 – 2/12/2003: near-bank shear stresses computed by DELFT3D and contribution of the different processes. 1: Flow stage; 2: Near-bank shear stresses; 3: Fluvial erosion; 4: Slide failure.*

Si riportano alcuni risultati relativi ad una simulazione effettuata sulla sponda del F.Cecina. Il tratto di studio ha una lunghezza di circa  $500 \text{ m}$  (area del bacino sotteso di

circa  $900 \text{ km}^2$ ); la sponda in arretramento si estende per circa  $170 \text{ m}$ , posizionata sul lato esterno di una brusca curva a basso raggio di curvatura con una barra di meandro molto

accentuata sul lato opposto (per una descrizione più dettagliata del tratto di studio e delle caratteristiche della sponda si rimanda a Rossi Romanelli et al., 2004). L'attività di monitoraggio è stata condotta per circa un anno ed ha incluso: (1) accurato rilievo topografico iniziale della sponda e dell'alveo per l'intero tratto di studio ai fini della successiva modellazione idrodinamica; (2) monitoraggio in continuo dei livelli idrometrici del fiume e della falda; (3) misure dell'arretramento della sponda attraverso picchetti metallici, rilievi topografici periodici e fotogrammetria terrestre.

La modellazione idrodinamica è stata effettuata per alcuni eventi di piena rappresentativi attraverso il modello numerico DELFT3D (WL – Delft Hydraulics) (si tratta per l'esattezza di un modello 2D mediato sulla profondità) (Mengoni, 2004). In particolare, è stata effettuata una simulazione completa (idrodinamica/erosione – filtrazione – stabilità) per un evento di piena multiplo verificatosi tra il 26/11 ed il 2/12/2003 caratterizzato da tre picchi distinti. A causa della configurazione morfologica planimetrica del tratto, ne è risultato un andamento temporale della tensione tangenziale in prossimità della sponda in erosione parzialmente inatteso (Fig. 3). I valori più elevati della tensione tangenziale infatti si registrano durante le fasi crescenti e decrescenti dell'idrogramma, mentre in prossimità dei due picchi principali si registra una brusca caduta delle tensioni, a causa del fatto che il flusso idrico comincia ad inondare la barra di meandro opposta ed il filone principale della corrente si sposta repentinamente dalla sponda alla parte centrale dell'alveo.

Per l'analisi di filtrazione, rispetto alla sponda del F.Sieve, è stata adottata una più affinata suddivisione della sponda, riducendo la dimensione delle singole celle nella regione soggetta ad erosione fluviale ad elementi quadrati di soli 10 cm di lato, in modo che esse fossero confrontabili con i tassi di erosione in un singolo passo temporale.

La simulazione completa (si veda 'Simulation 5' alla pagina <http://www.dicea.unifi.it/massimo.rinaldi/private/simulations.htm>) mette in evidenza una stretta interazione tra l'erosione fluviale, condizionata a sua volta dalle

variazioni delle tensioni prima descritte, ed i movimenti di massa, e mostra alcune caratteristiche distinte rispetto alla precedente simulazione. In questo caso, infatti, l'erosione fluviale non ha più un carattere quasi continuo ma anch'esso piuttosto discontinuo ed intermittente. Durante il picco principale dell'idrogramma di piena non si verifica erosione, a causa della brusca caduta di tensioni tangenziali, e la sponda rimane stabile anche rispetto ai movimenti di massa. Tutte le modifiche della sponda si verificano a partire dal passaggio tra fase decrescente del secondo picco ed inizio della fase crescente del terzo picco, allorquando le tensioni tangenziali raggiungono i valori massimi e sono tali da causare erosione al piede della sponda. A ciò fa seguito un evento principale di scivolamento, seguito da due scivolamenti minori di una porzione in aggetto, e da un'ulteriore erosione fluviale al piede durante la fase finale dell'evento.

I risultati di questa simulazione confermano il concetto, espresso nell'introduzione, secondo il quale modelli che incorporano complesse retroazioni, non linearità ed interazioni dinamiche portano spesso a risultati parzialmente inattesi rispetto al caso in cui i vari processi sono simulati singolarmente. La simulazione suggerisce ad esempio come, in alcune circostanze (ad esempio sulle sponde esterne di un meandro), l'erosione fluviale diventa particolarmente importante durante la fase discendente dell'idrogramma di piena, e le tensioni relativamente elevate possono essere tali da trasportare la maggior parte del materiale franato durante la fase precedente. Ulteriori movimenti di massa minori possono verificarsi durante la fase molto tardiva dell'evento, quando il flusso è ormai incapace di rimuovere i blocchi accumulatisi alla base. Questo potrebbe a sua volta suggerire che, in queste circostanze, il materiale franato che viene osservato dopo un evento può essere di nuovo solo una piccola parte di quello franato durante l'intero evento, e che il tempo di residenza del materiale franato alla base della sponda può essere molto inferiore rispetto a quanto spesso ci si potrebbe aspettare. Ulteriori ricerche sono comunque necessarie per investigare questi aspetti.

## Bibliografia

- Casagli, N., Rinaldi, M., Gargini, A. & Curini, A. (1999) - Pore water pressure and streambank stability: results from a monitoring site on the Sieve River, Italy. *Earth Surface Processes and Landforms*, 24 (12), 1095-1114.
- Dapporto, S. & Rinaldi, M. (2003) – Modelling of river bank retreat by combining fluvial erosion, seepage and mass failure. *Geophysical Research Abstracts*, EGS-AGU-EUG Joint Assembly, Nice, France, 6-11 April 2003.
- Darby, S.E., Spyropoulos, M., Bressloff, N. & Rinaldi, M. (2004) - Fluvial bank erosion in meanders: A CFD modelling approach. In: Garcia de Jalon Lastra D. & Martinez P.V. (2004,Eds.) - *Aquatic Habitats: Analysis & Restoration*. Proceedings of the Fifth International Symposium on Ecohydraulics, September 2004, Madrid, Spain (Volume 1), International Association of Hydraulic Engineering & Research, Madrid, 268-273.
- Hanson, G.J. & Simon, A. (2001) - Erodibility of cohesive streambeds in the loess area of the midwestern USA. *Hydrological Processes*, 15, 23-38.
- Lawler, D.M. (1992) - Process dominance in bank erosion systems. In: Carling, P.A. & Petts, G.E. (1992,Eds.) - *Lowland Floodplain Rivers: Geomorphological Perspectives*. John Wiley & Sons, 117-143.
- Lawler, D.M., Thorne, C.R. & Hooke, J.M. (1997) - Bank erosion and instability. In: Thorne, C.R., Hey, R.D. & Newson, M.D. (1997,Eds.) - *Applied Fluvial Geomorphology for River Engineering and Management*. John Wiley & Sons, 137-172.
- Leuthesser, H.J. (1963) - Turbulent Flow in Rectangular Ducts. *Proc. Am. Soc. Civ. Engrs.* 89, HY3.
- Mengoni, B. (2004) – River width adjustments: large-scale and local-scale approaches. PhD Thesis, Faculty of Engineering, University of Florence, 98 pp.
- Partheniades, E. (1965) - Erosion and deposition of cohesive soils, *J. Hydr. Div. ASCE*, 91,105-139.
- Rinaldi, M. & Darby, S.E. (2005) - Advances in

- modelling river bank erosion processes. In: Habersack, H., Ergenzinger, P., Hoey, T., Piégay, H. & Rinaldi, M. (Eds) - *Gravel-Bed Rivers* 6. From Process Understanding to the River Restoration. Series Developments in Earth Surface Processes, Elsevier, Netherlands, in press.
- Rinaldi, M., Casagli, N., Dapporto, S., Gargini, A. (2004) – Monitoring and modelling of pore water pressure changes and riverbank stability during flow events. *Earth Surface Processes and Landforms*, 29 (2), 237-254.
- Rossi Romanelli, L., Rinaldi, M., Darby, S.E., Luppi, L., Nardi, L. (2004) - Monitoring and modelling river bank processes: a new methodological approach. In: Greco, M., Carravetta, A. & Della Morte, R. (2004, Eds) - *Proceedings River Flow 2004*, Taylor & Francis Group, London, 993-998.
- Thorne, C.R. (1982) - Processes and mechanisms of river bank erosion. In: Hey, R.D., Bathurst, J.C. & Thorne, C.R. (1982, Eds) - *Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, 227-271.
- Walling, D.E., Owens, P.N. & Leeks, G.J.L. (1999) - Fingerprinting suspended sediment sources in the catchment of the River Ouse, Yorkshire, UK. *Hydrological Processes*, 13, 955-975.