

Origine e dinamica della morfologia a gradinata (step pool) nei torrenti alpini ad elevata pendenza

Introduzione

La morfologia dominante di un corso d'acqua è il prodotto finale di numerosi fattori geologici, climatologici, idrologici ed idraulici avvenuti in tempi molto lunghi (anche alcuni milioni di anni). La conformazione di un alveo riflette quindi, in un certo intervallo di tempo, l'andamento, la modalità di combinazione e il peso dei vari processi fisici. Ciò non implica necessariamente condizioni di staticità, in quanto durante eventi idrologici "straordinari" (con tempi di ritorno T_r superiori ai 50 anni) un corso d'acqua può modificare notevolmente il proprio tracciato planimetrico e la geometria del canale ma, con il susseguire di eventi di piena "ordinari" (con T_r variabili tra i 2 e i 10 anni), la morfologia dell'alveo tende ad assumere poi, le caratteristiche dominanti che aveva inizialmente (D'AGOSTINO, LENZI, 1996).

Ogni alveo possiede una propria dinamica che si realizza attraverso adattamenti ai propri limiti di deflusso, al regime degli apporti di sedimento ed alla distribuzione granulometrica del materiale del letto, costituendo così la morfologia che lo caratterizza. Spesso si trascura la naturale propensione al cambiamento dei corsi d'acqua e si è restii a comprendere ed osservare nel tempo le eventuali tendenze evolutive in atto. Si cerca allora di contrastare o ripristinare i collettori momentaneamente disturbati con interventi che talvolta possono amplificare lo squilibrio o l'instabilità iniziale. Un'approfondita conoscenza

della morfologia del corso d'acqua risulta dunque essenziale per la valutazione del grado di stabilità del torrente, per la comprensione della dinamica del trasporto solido, nonché per la raccolta di informazioni da utilizzare in sede pianificatoria, progettuale e di realizzazione degli interventi di idraulica fluviale.

Un aspetto morfologico fondamentale di ogni corso d'acqua è costituito dalla successione di tratti a pendenza più sostenuta e profondità di flusso modeste ("riffle") con tratti a profilo più piatto e tiranti d'acqua più elevati ("pool"). Questa alternanza di riffle e pool caratterizza infatti, seppure con condizioni diverse, quasi tutti i corsi d'acqua naturali (LEOPOLD, WOLMAN, 1957; LEOPOLD *et al.*, 1964) ed è accompagnata dal susseguirsi ritmico di barre longitudinali e, talora, trasversali. Questi corpi sedimentari che possono migrare, distruggersi e riformarsi sono degli elementi che rappresentano dei veri e propri indicatori della dinamica d'alveo.

Quando le pendenze di un corso d'acqua montano divengono superiori al 2-3% ed il letto rende disponibile una granulometria molto assortita, i riffle si raccorciano, dando luogo ad una unità morfologica a gradino (step). Il profilo longitudinale assume in questi tratti un marcato andamento a gradinate (sequenze di step e pool), molto simile a quello che si ottiene con una serie di briglie di consolidamento. Lo stesso step, che viene ad essere costituito dall'embriciamento dei massi di maggiori dimensioni costituenti il letto (BILLI *et al.*, 1995;

D'AGOSTINO, 1996; LENZI *et al.*, 1997), è assimilabile ad una piccola opera trasversale di altezza non rilevante (0.3 - 2.5 m.). Va peraltro sottolineato come l'eterogeneità granulometrica del sedimento sia un fattore che condiziona lo sviluppo delle gradinate.

Alcune ricerche di laboratorio (WHITTAKER, JAEGGI, 1982; WHITTAKER, 1987) hanno dimostrato che le sequenze a step pool si comportano come "strutture" stabili fino a piene con tempi di ritorno di 30-40 anni. Per deflussi ancora più intensi queste sequenze possono distruggersi per riformarsi in differenti tratti dell'alveo o trasformarsi parzialmente. Tali cambiamenti non sono stati finora adeguatamente osservati in campo ed opportunamente documentati nella letteratura scientifica (D'AGOSTINO, 1996). Le ostili condizioni climatiche e fisiografiche, le difficoltà di accesso ai luoghi e la tempestività necessaria per rilevare i parametri idraulici e geomorfologici in condizione di piena, limitano la raccolta di dati, determinando di riflesso la diffusa carenza informativa.

Dal 1986 è in funzionamento sul bacino del Rio Cordon (5 km²), che ricade nel bacino del torrente Cordevole (provincia di Belluno), una stazione sperimentale per la misura simultanea dei deflussi liquidi e delle portate solide. Il collettore principale del Rio Cordon è stato oggetto, durante l'estate del 1993, di rilievi topografici di dettaglio aventi come finalità la caratterizzazione geometrica delle principali sequenze a "gradinata" che interessano l'alveo. Il 14 Settembre 1994 si è verificato un evento di piena con una portata al colmo di 10.4 m³ s⁻¹ che, per l'eccezionalità delle precipitazioni che l'hanno generato, è risultato avere un tempo di ritorno compreso fra i 30 ed i 50 anni. Questa piena ha provocato consistenti modificazioni morfologiche dell'alveo del torrente: alcune sequenze a gradinata sono state parzialmente, o completamente, distrutte e/o interrite a mezzo di sedimento fine, mentre altre si sono formate a monte delle unità precendenti.

I rilievi topografici delle sequenze morfologiche sono stati ripetuti dopo il passaggio della piena. Le operazioni di campagna

sono state svolte con dettaglio, ricercando in alveo la posizione delle precedenti unità morfologiche a step pool e rilevando quelle di nuova formazione. È stato così possibile sovrapporre al meglio i profili longitudinali prima e dopo l'evento e consentire un'obiettiva valutazione delle modificazioni d'alveo. Attraverso questo confronto si è potuta correlare la geometria degli step pool con le principali caratteristiche idrauliche e sedimentologiche del torrente, verificando inoltre le teorie messe a punto in laboratorio sull'origine, la formazione e l'evoluzione degli step pool (WHITTAKER, 1985, 1987; WHITTAKER, JAEGGI, 1982; GRANT *et al.*, 1990; GRANT, 1994; WHOOL, GRODEK, 1994; ABRAHAMS *et al.*, 1995).

Classificazione degli step pool

Le tipologie morfologiche di maggiore evidenza e ripetitività che si possono riscontrare nei corsi d'acqua montani possono essere sinteticamente raggruppate nelle unità a riffle-pool ed a step-pool. Nei torrenti caratterizzati da gradienti modesti (pendenza inferiore al 2-3%) e da granulometrie contenute (alvei di sabbia, ghiaia e/o ciottoli) le variazioni altimetriche ritmiche del fondo del canale, definite sequenze a riffle-pool, sono state studiate da diversi autori in funzione del loro rapporto con la granulometria dell'alveo, la larghezza e la profondità media del canale, il tipo e la modalità di trasporto solido (LEOPOLD *et al.*, 1964; YANG, 1971; RICHARDS, 1976, 1978a, 1978b; KELLER, MELHORN, 1978; MILNE, 1982). Meno chiare risultano invece le distinzioni e classificazioni proposte per la morfologia a gradinata (o step pool) nei torrenti ad elevata pendenza (> 3-4%) e granulometria decisamente più grossolana.

Le diverse terminologie utilizzate per caratterizzare osservazioni di campo simili oppure confrontabili derivano dalla diversità dei parametri utilizzati per distinguere le varie forme di fondo e, talvolta, dalla difficoltà nell'assegnare confini precisi fra le

varie morfologie. Ad esempio, in base al materiale di cui sono costituiti, Hayward (1978, 1980) propose la distinzione di tre tipi di steps: boulder-steps, riffle-steps e rock-steps, (fig. 1). I primi consistono in un raggruppamento di massi ordinati lungo una retta o una curva disposta trasversalmente rispetto al canale. I riffle-steps sono formati da un insieme di sedimenti di dimensioni superiori alla media, i quali incrementano la pendenza del profilo longitudinale del canale. I riffle-steps possono incorporare boulder-steps, questo può accadere su pendenze minori del 5%. Infine, i rock-steps si trovano dove il canale è confinato dalla roccia madre. In questo caso la morfologia d'alveo dipende maggiormente dalle condizioni geologiche e meno importanti risultano essere quelle idrauliche (CHIN, 1989).

In aggiunta a questi tre principali tipi di step, vanno menzionati i log-step, che sono costituiti da detriti vegetali ed in particolare da tronchi caduti all'interno dell'alveo e successivamente incorporati nel letto del corso d'acqua (incastrandosi ed appoggiandosi agli elementi lapidei di maggiori dimensioni). È stato osservato un intervallo metrico tra i log-step corrispondente a circa una, due volte la larghezza del canale, del

tutto analogo a quello rilevato per gli step-pool (KELLER, SWANSON, 1979). Sebbene i log-step siano differenti dagli step pool, alcuni autori attribuiscono loro un ruolo simile soprattutto per quanto riguarda la dissipazione dell'energia eccedente; va comunque sottolineato che queste strutture poco hanno in comune con la meccanica di formazione dei boulder-steps.

Dal punto di vista morfologico il profilo longitudinale della struttura a step-pool ha le sembianze di una gradinata. L'acqua defluisce sopra gli step, formati da un allineamento di grossi massi disposti trasversalmente da un lato all'altro del canale, e si riversa nei pool sottostanti, dove una parte significativa di energia viene dissipata all'interno di un vortice ad asse orizzontale frequentemente annegato per effetto del livello idrometrico imposto dal successivo step di valle. Il flusso può essere interpretato sotto l'aspetto idraulico come una serie di cascate distanziate in modo più o meno regolare e caratterizzate da velocità localmente elevate e zone turbolente, spesso combinate con fenomeni di areazione dell'acqua (WHITTAKER, 1982).

Esistono delle analogie tra le sequenze a step-pool e quelle a riffle-pool soprattutto per quanto concerne la loro ripetitività. Le

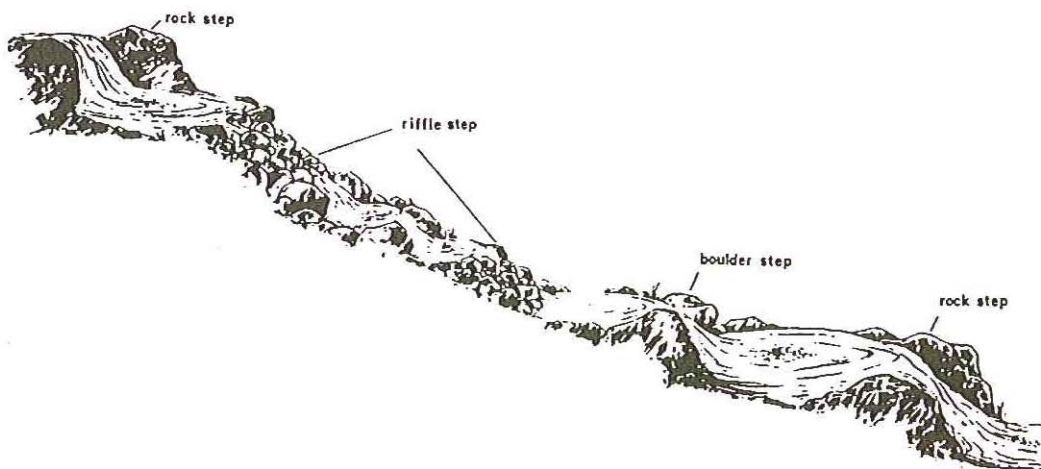


Fig. 1 - Schematizzazione della morfologia a step-pool (da Hayward, 1980).

sequenze a riffle-pool si riscontrano in fiumi con pendenze minori e sono associate con la formazione di barre e meandri e con una distanza tra riffle successivi dell'ordine di 5-7 volte la larghezza del canale. Il sistema a step-pool presenta una lunghezza d'onda minore la quale, come è stato più volte dimostrato, è risultata correlata con la larghezza del canale anche se in proporzioni diverse (KELLER, MELHORN, 1978; KELLER, TALLY, 1979; GRANT *et al.*, 1990; CHURCH, GILBERT, 1975; LEOPOLD *et al.*, 1964; BILLI, 1994; ERGENZINGER, 1992).

Altri elementi di possibile comparazione possono essere la simile frequenza probabile degli eventi idrologici di disturbo della struttura e l'assortimento granulometrico differenziato fra i pool, costituiti da sedimento più fine, e i riffles e gli steps, costituiti dal materiale più grossolano del letto (WHITTAKER, 1982).

Alcuni autori hanno definito gli step "transverse rib", (ASHIDA *et al.*, 1976; HAYWARD, 1978; LEOPOLD *et al.*, 1964; O'LOUGHLIN, 1969). I transverse rib presentano delle analogie con gli step, sono infatti costituiti dall'allineamento di ciottoli trasversali alla direzione della corrente che si elevano rispetto alla quota di base del letto. La caratteristica principale che li distingue dagli step consiste nella mancanza di interramento a monte del rib. In altre parole, supponendo di essere in condizioni di assenza di flusso, se si osserva la struttura da monte sarà possibile notare le alzate di questi piccoli gradini, cosa non riscontrabile per uno step al quale il profilo di fondo si raccorda con continuità a partire dal piede dello step a monte. La somiglianza è allora superficiale, in quanto gli steps evidenziano una struttura saldamente concatenata intorno ad alcune particelle chiave, particolarità questa non comune ai transverse rib. Va inoltre sottolineato che la formazione di queste strutture è stata osservata durante prove di laboratorio in canali artificiali, tentando di simulare e riprodurre le condizioni idrauliche e morfologiche predisponenti la costituzione delle unità a gradinata, mentre senz'altro più sporadica è la loro presenza in campo rispetto agli step. Church e Jones

(1982) indicano come piuttosto comune la loro formazione nei corsi d'acqua con alveo ghiaioso dove il materiale è più uniformemente suddiviso.

Secondo Whittaker, in accordo con Chin (1989), gli step-pool prendono forma dove le pendenze sono superiori al 5%, ciò in armonia con il gradiente posseduto dai torrenti Upper Torlesse, Irishman Stream, Torlesse Stream (Nuova Zelanda) nei quali l'autore ha svolto le sue ricerche e ove le pendenze erano comprese tra il 5% e il 18%. Una conferma di tale osservazione è l'evidente tendenza dei tratti a gradinata a divenire più chiaramente definiti e regolari all'aumentare della pendenza (HAYWARD, 1978, 1980; HEEDE, 1972, 1981; JUDD, 1964; JUDD, PETERSON, 1969).

Grant *et al.* (1990) hanno esaminato la morfologia di due torrenti dell'Oregon che presentavano pendenze variabili tra il 2.2% e il 4.3%, diametri medi del materiale d'alveo compresi tra i 13 ed i 20 cm, altezze medie di bacino di circa 1200-1300 m s.l.m. e aree sottese, rispettivamente, di 67 e 83 Km², rilevando tuttavia delle tipiche strutture a step pool. L'autore stesso sottolinea che, dove la concentrazione di materiale lapideo è elevata e le pendenze sono maggiori del 2%, la configurazione d'alveo dominante è quella a gradinata. In essa gli step sono composti da grossi massi e separati da pool per una distanza pari a circa 0.4-0.8 volte la larghezza del canale. Nello studio di Grant il rapporto fra la larghezza dello step e la larghezza d'alveo misurata subito a valle del salto è superiore all'unità. Gli step presentano una distanza tra la cresta e il piede della struttura variabile tra 0.5 e 2 m. Sono solitamente localizzati dove grossi massi, con diametro maggiore di 1.5 m, od il letto di natura rocciosa formano delle costrizioni dell'alveo rendendo così possibile "l'intrappolamento" di clasti e ciottoli di minori dimensioni ed anche di detriti legnosi. Le alzate dei singoli step sono in genere composte da alcuni grossi blocchi di materiale lapideo, orientati con l'asse maggiore trasversale alla direzione della corrente e con l'asse medio parallelo al flusso o leggermente inclinato a monte

con angoli di 5° o meno; in questo modo l'altezza verticale dello step è circa uguale all'asse minore dei clasti di maggiori dimensioni.

Dall'analisi sperimentale svolta nei luoghi anzidetti GRANT *et al.* (1990) hanno osservato che i clasti costituenti gli step erano simili per tutte le unità morfologiche prese a campione, avendo una dimensione intermedia di 1.1 m che corrispondeva alle maggiori taglie granulometriche presenti in entrambi i torrenti. Anche le altezze risultavano simili per tutti i luoghi, variando da un valore di 0.13 m a 0.29 m con una media di 0.22 m. Tutto ciò ha consentito di affermare che la consistenza della struttura a gradinata sembrava risultare dalla somiglianza nella forma e dimensione delle particelle che componevano i singoli step, concorrendo a tale fenomeno la natura del fondo roccioso e i massi ubicati lungo il margine dell'alveo.

Un tentativo di sintesi delle differenti classificazioni proposte è stato condotto da alcuni ricercatori (SCHÄLCHL, 1991; GRANT 1994; ROSGEN, 1994; ROSPORT, DITTRICH, 1995) dai quali può desumersi un quadro delle diverse terminologie in uso e del loro significato (tabella 1).

Gli schemi di analisi a cui si fa riferimento, relativi quasi sempre a condizioni idrauliche stazionarie, risultano pur sempre semplificativi rispetto alla complessità dei processi naturali, condizionati principalmente dall'alternarsi di eventi idrologici di tipo eccezionale con eventi di piena di tipo ordinario. I primi possono infatti sconvolgere l'assetto morfologico preesistente mentre i secondi, pur essendo elementi di disturbo, non modificano sostanzialmente l'assetto dominante dell'alveo e si configurano come degli aggiustamenti progressivi e successivi che si sovrappongono alla configurazione indotta dall'evento di tipo eccezionale che li ha preceduti. Va inoltre sottolineato come gli studi scientifici finora disponibili, relativi alle osservazioni dirette ed ai rilievi di campagna necessari alla caratterizzazione di queste strutture, manchino sostanzialmente di riferimenti temporali precisi per quanto concerne il periodo di

tempo trascorso tra il rilievo e l'ultimo evento di piena "straordinario" verificatosi in quel bacino. Come verrà di seguito dimostrato questo elemento, spesso trascurato, può condizionare anche in modo rilevante i diversi parametri ottenuti dalle osservazioni di campagna condotte su di uno stesso torrente.

Condizioni di formazione e dinamica degli step pool

Dall'analisi delle precedenti ricerche condotte in campo emerge chiaramente che gli step assumono connotazioni morfologicamente più marcate all'aumentare della pendenza del torrente. Judd e Peterson (1969) osservarono per primi questa tendenza per i "boulder-step", sottolineando la maggiore definizione e regolarità degli step all'aumentare del gradiente. Analogamente Grant *et al.* (1990) osservarono le "rapide", unità in cui gli allineamenti dei ciottoli non sono regolari e non interessano sempre l'intera larghezza del canale, in un campo di pendenze compreso fra il 2 ed il 3.5% e gli step in un range del 4 - 40%.

Quando le portate liquide sono di notevole entità gli step possono venire sommersi quasi completamente. Per bassi valori di portata, invece, la massa d'acqua defluisce in regime supercritico sopra od attraverso i grossi massi che costituiscono il gradino, riversandosi poi nel pool sottostante, ove la velocità ritorna in regime subcritico. Questo tipo di regime idraulico è stato definito "tumbling flow" da Peterson e Mohanty (1960). Si viene così a creare uno sviluppo ciclico fatto di accelerazioni e decelerazioni le quali caratterizzano questo particolare profilo idraulico. Il fenomeno potrebbe assimilarsi al risalto idraulico che si produce durante il passaggio da un regime rapido ad uno lento, dove la riduzione di velocità viene trasformata in energia potenziale con la conseguente produzione di vortici dissipativi ed un innalzamento del tirante idraulico a valle del pool. Tuttavia il comportamento idraulico a valle dello step risulta

Tab. 1 - Caratteristiche delle principali unità morfologiche dei torrenti montani.

Terminologia	Descrizione Morfologia	Tipo di flusso in condizione di magra	Autore	Nomenclatura originaria	Pendenza (%)	Diametri caratteristici [m]	Altezza step
Alveo scabro ("rough bed")	Singoli ciottoli omogeneamente distribuiti sul letto del torrente	Flusso uniforme ed elevata sommergenza relativa	Grant	Riffles / Pools	1.0 - 2.0	D_{s4}	
	Non si formano i "transverse rib" (allineamento di ciottoli disposti trasversalmente alla corrente)		Schälchli	Flat, rough bed	1.5 - 5.0	D_{max} : 0.5-0.7	
Riffle-Step	Allineamenti di ciottoli in forma irregolare (irregular "rib"). I rib possono essere disposti: - obliqui o perpendicolari al flusso - per tutta o parte la larghezza dell'alveo - disposti ad arco I riffle sono separati da corti pool	Tratti alternati di corrente supercritica e subcritica	Grant	Rapids	2.0 - 3.5	D_{s4} : 0.4-0.6	0.7 D_{max}
			Schälchli	Riffles and Pools	1.5 - 7.0	D_{max} : 0.6-0.9	
		Hayward	Riffle-Step	< 5.0			
Step-Pool (Gradinate)	Insieme di massi e ciottoli incastrati che formano un gradino. I gradini (step) si dispongono: - perpendicolari al flusso - su tutta la larghezza dell'alveo - formando un salto definito Gli step sono separati da corti pool e da tratti in corrente rigurgitata	"Tumbling flow"	Peterson e Mohanty	Steps and Pools	> 5.0		1.0 D_{s4} 1.0 D_{max}
			Hayward	Boulder-Steps Rocksteps			
		Grant	Cascades	3.0 - 7.0	D_{s4} : 0.6-1.2		
		Schälchli	Steps and Pools	3.5 - 12.5	D_{max} : 0.9-1.2		
		Whittaker, Judd e Peterson	Steps and Pools	5.0 - 20.0			
Cascade Glides (Salti idraulici o Scivoli)	Impilamento di elementi molto grossolani (massi, blocchi, roccia affiorante, tronchi d'albero che formano salti di fondo, cascate o scivoli. Questi sono disposti: - perpendicolari al flusso - su tutta la larghezza dell'alveo - in modo da agire come uno sbarramento I salti sono separati da pozze profonde	"Tumbling flow" anche con deflussi sostenuti: la massa d'acqua in regime supercritico, rotola sopra i grossi massi formando dei salti idraulici nei pool; la velocità ritorna quindi in regime subcritico	Grant	Bedrock-Boulder - Log-Steps	4.5 - 40	D_{max} > 1.5	0.7-1.3 D_{max}
			Schälchli	Boulder-Steps Glides e Pools	9.0 - 30	D_{max} : 1.1-2.0	1.0-2.5 D_{max}

spesso più simile a quello di un vortice anegato dal profilo di rigurgito indotto dallo step di valle piuttosto che a quello di un classico risalto idraulico.

La resistenza al moto della corrente è dominata dalla caduta libera (LEOPOLD *et al.*, 1964; JUDD, PETERSON, 1969; HAYWARD, 1978, 1980); sotto questo aspetto le sequenze a gradinata determinano un regime di scabrezza in cui la resistenza di forma è preponderante rispetto alla scabrezza di grano.

La forma delle gradinate può essere caratterizzata da due variabili morfometriche: la lunghezza dello step ($L_s = L$) e la altezza dello step (H) (fig. 2a, fig. 2b), definita come la distanza fra il fondo del pool e la cresta del gradino. I parametri L_s ed H vengono misurati, rispettivamente, parallelamente alla pendenza media (S) del torrente ed ortogonalmente alla orizzontale. In questo modo il rapporto H/L risulta fortemente correlato alla perdita di carico per unità di lunghezza del canale nella direzione del moto, cioè proporzionale alla dissipazione di energia dovuta alla resistenza al flusso.

Alcuni autori (JUDD, PETERSON, 1969; HEEDE, 1981; WHITTAKER, 1987; CHIN, 1989; GRANT *et al.*, 1990; GRANT, 1994; WOHL, GRODEK, 1994) hanno evidenziato che la lunghezza media degli step ($L_s = L$) relativa ad una sequenza a gradinata è legata alla pendenza del letto attraverso una relazione del tipo:

$$L = K / (a S^b) \quad (1)$$

nella quale K rappresenta una dimensione caratteristica della granulometria del letto,

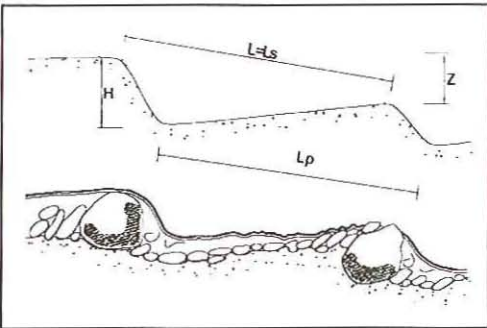


Fig. 2a - Schema di un tratto a step pool.

mentre a e b sono costanti rappresentative del tipo di bacino considerato. Utilizzando i dati ricavati da un'indagine svolta da Hayward (1978) nel torrente Torlesse (Nuova Zelanda), Whittaker (1987) determinò l'espressione:

$$L = 0.313 / S^{1.118} \quad (2)$$

nella quale L è espresso in metri. Successivamente Humborg (1995), utilizzando nuovi dati, pervenne all'identificazione dei seguenti valori: $a = 1$, $b = 0.812$ e $K = 0.76$ (eq.(1)).

Wohl e Grodek (1994), nel bacino di Nahal Yael (Israele), hanno anche determinato una buona correlazione tra la altezza media degli step \bar{H} relativa ad una sequenza di gradinate e la pendenza S del torrente. Tale legame implica che anche il rapporto L/H potrebbe essere positivamente correlato con il gradiente. Wohl e Grodek (1994) hanno infatti ottenuto la seguente equazione di regressione valida per i boulder ed i rock step:

$$\bar{L} / \bar{H} = 4.5 S^{-0.42} \quad (3)$$

in cui \bar{L} indica il valore medio della lunghezza d'onda di una sequenza di step.

L'interazione fra la pendenza dell'alveo, la dimensione dei sedimenti ed il regime idraulico della corrente definisce le principali condizioni che determinano la forma-



Fig. 2b - Esempio di un tratto a step pool.

zione degli step pool. Secondo Abrahams *et al.* (1994) possono essere individuate due situazioni estreme:

- le dimensioni del detrito sono superiori a quelle competenti alla capacità di trasporto della corrente su quella determinata pendenza; il materiale detritico rimarrà dunque bloccato all'interno dell'alveo senza dare origine ad una regolare sequenza a gradinata;
- se invece il detrito ha dimensioni sufficientemente piccole per essere facilmente trasportato dal flusso su quella pendenza, il canale sarà costituito da rapide o dalla roccia madre.

Le condizioni intermedie tra questi due estremi permettono la costituzione delle unità a step pool, dove solo le piene di notevole entità comportano la mobilitazione del materiale lapideo più grossolano.

Secondo Grant *et al.* (1990) per la formazione di un'unità a gradinata divengono indispensabili le seguenti condizioni:

- a) eterogeneità granulometrica del materiale d'alveo con presenza di grossi massi statici in condizioni di flusso moderato;
- b) regime idraulico capace di muovere occasionalmente anche le particelle più grandi sotto condizioni di flusso quasi critiche;
- c) bassa disponibilità di sedimento;
- d) alvei con rapporti larghezza profondità piccoli e sponde irregolari e resistenti.

Le osservazioni in campo svolte dallo stesso autore mettono in luce l'assenza di unità a step pool dove i canali sono larghi, la scorta di sedimenti consistente e le pendenze risultano inferiori al 2%. La ricostruzione idraulica delle portate di formazione degli step in alcuni siti di studio ha anche evidenziato un regime di flusso critico o

supercritico all'interno di gran parte del canale e profondità dell'acqua all'incirca uguali al diametro massimo del materiale di fondo. In queste condizioni i grossi massi che sporgono sopra la superficie del letto o i restringimenti dell'alveo, causati dalla particolare conformazione del basamento roccioso, favoriscono la formazione di salti idraulici. In prossimità di questi ultimi la corrente, impattando i blocchi lapidei marginali, subisce una brusca diminuzione di velocità e promuove il deposito di ulteriori frammenti che vanno a costituire definitivamente lo step (GRANT *et al.*, 1990).

Non secondaria, per il processo di formazione, è inoltre l'importanza delle erosioni di pendio che, consegnando all'alveo particelle di ragguardevoli dimensioni, facilitano lo sviluppo delle unità a step pool.

Hayward (1980) ribadì, come condizione essenziale di genesi, la presenza di una granulometria diversificata, in quanto in un alveo sia pur composto da sedimento grossolano ma omogeneo non sarebbe possibile l'indispensabile sistemazione ed embriciamento delle particelle.

Whittaker (1982) associò la formazione degli step pool a pendenze superiori al 7.5% accostate a regimi di flusso di notevole intensità ed elevato tempo di ritorno. Sottolineò quindi l'influenza delle passate e presenti condizioni climatiche ed idrologiche.

Duckson e Duckson (1995) indagarono sullo sviluppo degli step pool in differenti situazioni litologiche. Esaminarono la forma, le dimensioni e la lunghezza d'onda di un elevato numero di step pool giacenti su substrati andesitici, basaltici, dacitici e su sedimenti glaciofluviali di alcuni corsi d'acqua dell'Oregon High Cascades (tabella 2).

Tab. 2 - Valori geometrici caratteristici dei tratti a step-pool rapportati alla litologia: Oregon High Cascades (da Duckson, Duckson, 1995).

Valori medi	Andesite	Basalto	Dacite	Sedimenti glaciofluviali
Altezza step (m)	0.27	0.37	0.23	0.24
Lunghezza pool (m)	1.02	1.13	0.69	0.83
Profondità del pool (m)	0.25	0.33	0.15	0.32
Area del pool (m ²)	1.43	1.83	0.45	0.78

Le differenze fra l'altezza degli step, le lunghezze, le profondità e le superfici occupate dai pool non risultò statisticamente significativa, tuttavia gli step sviluppatisi su rocce dacitiche erano dimensionalmente più piccoli e presentavano di conseguenza pool più corti, meno profondi e meno estesi. Inoltre la lunghezza d'onda degli step esibiva un andamento piuttosto regolare nei siti d'origine glaciofluviale, al contrario si presentava irregolare nelle strutture formatesi su substrati vulcanici.

Secondo alcuni autori il meccanismo di formazione della morfologia a gradinata è connesso ad un trasporto preferenziale delle particelle più piccole, lasciando così in superficie uno strato a granulometria più grossolana che viene definito come superficie corazzata ("armour layer").

Whittaker (1987) sostiene che, sebbene il sedimento presente nei pool sia più fine, l'intera struttura dello strato di fondo del pool tenda ad essere estremamente embriicata e dia luogo, durante gli eventi di piena di notevole entità, alla formazione di una superficie perfettamente piana tra la fine della pozza (pool) ed il nuovo step.

Alcuni autori (ASHIDA *et al.*, 1984; GRANT, MITZUMAYA, 1991; GRANT, 1994) hanno affermato, sulla base di ricerche di laboratorio, che le morfologie a gradinata traggono origine dalla formazione di antidune in fase con un'onda superficiale stazionaria. In accordo con tale affermazione Grant (1994) delinea la sequenza di formazione della configurazione a gradinata partendo da un letto livellato (fig. 3). Le condizioni sperimentali iniziali evidenziano un fondo piatto con una certa pendenza, formato da materiale di diversa distribuzione granulometrica. Quando l'acqua comincia a fluire inizia il trasporto al fondo secondo i tre classici meccanismi di movimento: rotolamento, trascinamento, saltellamento (fig. 3-a). Dopo poco, in condizioni di flusso con numero di Froude della corrente prossimo all'unità, la deformazione del letto dà luogo a regolari antidune in fase con la superficie libera dell'acqua (fig. 3-b). La deformazione del fondo fa sì che le particelle di maggiore dimensione vadano inter-

mittentemente ad occupare la parte immediatamente a valle dell'antiduna per una azione combinata del movimento della antiduna e dell'acqua (fig. 3-c). Ciò favorisce l'arresto e la successiva deposizione di grani più piccoli, in tal modo si va a costituire un accumulo di materiale fortemente embriciato (fig. 3-d). La minore profondità sopra i grossi massi induce la formazione di un salto idraulico sulla cresta dell'antiduna. La turbolenza associata a questo salto è causa dell'erosione localizzata subito a valle dei clasti, accentuando così il rilievo dello step neoformatosi (fig. 3-e). L'intera evoluzione si manifesta simultaneamente con lo sviluppo di un fondo corazzato ("armour layer"). Infine quando la capacità di trasporto della corrente decresce, lo scavo provocato dall'erosione (pool) si riempie di sedimento fine (fig. 3-f).

Grant (1994), a conferma della sopracitata teoria, sottolinea la discreta correlazione (coefficiente di correlazione: $r = 0.7$) fra la distanza step-step, (da cresta a cresta) e la lunghezza d'onda delle antidune (L_b). Questa è definita dalla espressione $L_b = 2 \pi V^2 / g$, dove V è la velocità media del flusso e g l'accelerazione di gravità (KENNEDY, 1963). Si può dunque affermare che la distanza fra gli step è un buon indicatore della velocità richiesta per il trascinamento delle particelle e la successiva formazione degli step. Ashida *et al.* (1984) riportarono i dati relativi agli step pool ricavati dalle esperienze di laboratorio nel diagramma di Kennedy (1963), che correla il numero di Froude Fr con kh , essendo kh il numero d'onda definito dalla espressione $2\pi h / L_b$ con h profondità media del flusso. Tali dati trovano collocazione entro, o comunque in stretta vicinanza, del dominio delle antidune. I sopraccitati confronti, tra le strutture a gradinata sviluppate in laboratorio e le antidune, indurrebbero a sostenere, quindi, la teoria delle antidune.

Whittaker e Jaeggi, (1982), nel tentativo di chiarire il processo d'origine di una sequenza a step pool, effettuarono delle prove di laboratorio in condizioni di flusso variabili senza l'introduzione di additivi solidi a

monte del canale sperimentale e operando con pendenze comprese tra il 2.5% e il 25%. Emersero così due distinte situazioni di sistemi a step pool:

- con pendenze basse e portate relativamente elevate, si formavano delle classiche antidune, del tutto simili a quelle riportate da Shaw e Kellerhals (1977); riducendo successivamente la portata si aveva l'impressione di osservare una sequenza a rifflé pool con un lunghezza d'onda determinata da quella dell'originaria antiduna e la formazione di un risalto a valle della testa della duna;
- con pendenze elevate e portate relativa-

mente basse il sedimento a grana grossa aveva considerevoli effetti sul processo di deformazione del letto; il flusso formava inizialmente treni d'onda regolari ma, in seguito alla modificazione del fondo, la traiettoria del flusso andava sempre più ad assecondare la posizione degli elementi di dimensioni più elevate; per una portata inferiore a quella formativa l'andamento del flusso risultava molto somigliante a quello delle sequenze a step pool naturali.

La pendenza che sancisce la transizione tra i due casi sopra menzionati è pari a al 7.5%.

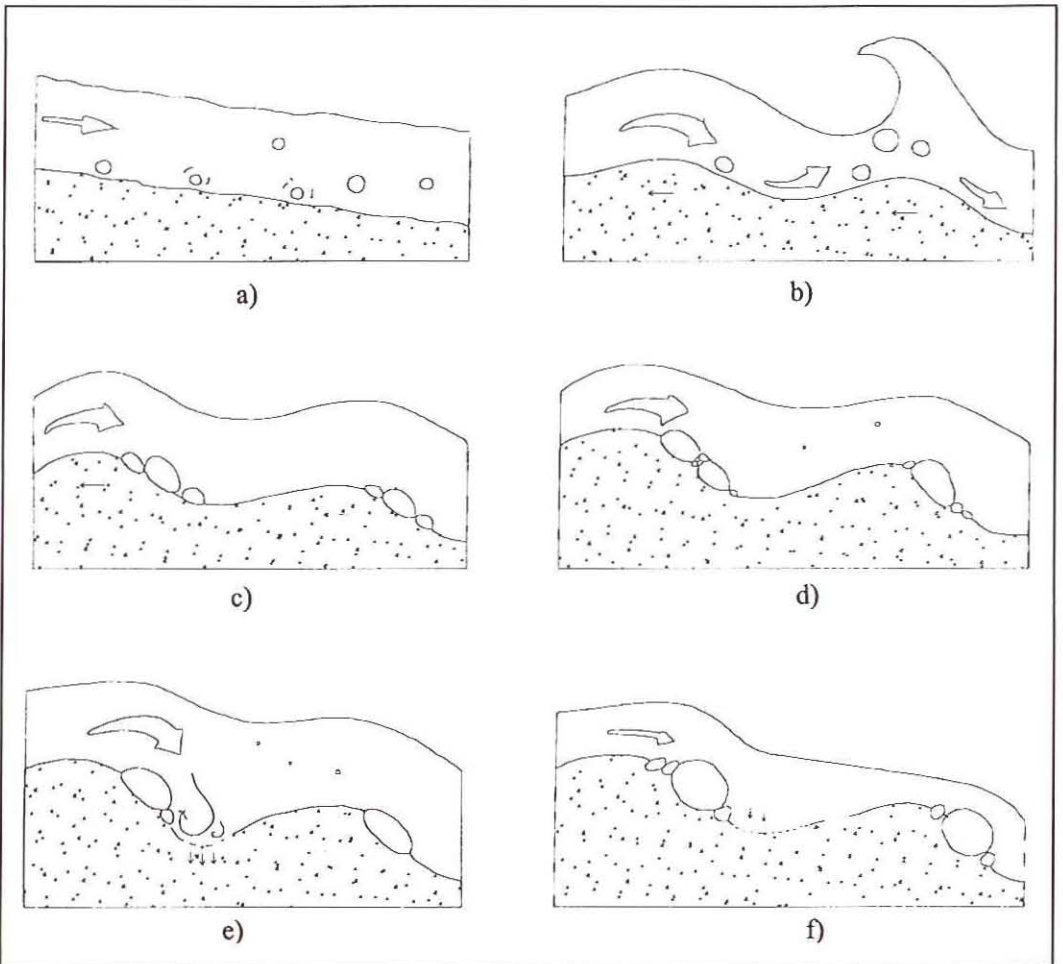


Fig. 3 - Meccanismo di formazione delle strutture a gradinate seguendo la teoria dell'antiduna (ASHIDA *et al.*, 1984; GRANT, MIIZUYAMA, 1991; GRANT, 1994).

Per pendenze superiori al 7.5% la deformazione del fondo è accompagnata da un notevole incremento della resistenza al flusso e dalla formazione di un letto corazzato da materiale grossolano. Il materiale lapideo di grosse dimensioni, incastrandosi ed embriciandosi, blocca la migrazione verso monte delle antidune e favorisce in questo modo la degradazione del letto e l'incremento della resistenza al flusso. Il numero di Froude si riduce fino ad un certo punto oltre il quale le gradinate non potrebbero essere considerate in modo analogo alle antidune.

Per pendenze minori del 7.5% non si evidenziano invece cambiamenti apprezzabili della resistenza al flusso; in queste situazioni si sviluppano allora delle regolari antidune dove il riarrangiamento dello strato superficiale è predominante rispetto al corazzamento del letto con componenti grossolane.

Dall'analisi dei risultati le conclusioni furono che la struttura a gradinata si genera durante eventi caratterizzati da portate di una certa rilevanza, mentre con flussi moderati se ne evidenzia l'aspetto caratteristico. Il meccanismo di deformazione che, partendo da un alveo livellato, porta ad una morfologia a step pool, è il medesimo implicato nella produzione di antidune nei fiumi con fondali sabbiosi, sebbene gli effetti dovuti all'eterogeneità del sedimento disturbino la regolarità del processo.

Rosport e Dittrich, (1995), nell'ambito delle attività di ricerca realizzate durante il triennio 1993-1995 (EROSLOPE I, Project No. EV5V-CT92-0179, finanziato dall'Unione Europea), riportano i risultati delle prove di laboratorio svolte in un canale artificiale (della lunghezza di 7.8 metri, della larghezza di 20 cm e con pendenze iniziali dell'8 % e del 10 %) nel quale utilizzarono due differenti composizioni granulometriche con diametri massimi pari a 32 e 64 mm. Lo studio è focalizzato sullo sviluppo degli step pool originati da una serie di piccole piene tali da causare la costituzione e la successiva distruzione del corazzamento del letto. Fondamentalmente in questo test possono essere distinte due

fasi di sviluppo del letto. Nella prima ha inizio il processo di costituzione dell'alveo, il trasporto solido è elevato e si formano delle antidune la cui permanenza è limitata nel tempo e per le quali si riscontra una sostanziale analogia per entrambe le granulometrie utilizzate. Infatti, quando la posizione delle antidune viene delineata dalle particelle più grossolane, la parte a valle viene erosa provocando la distruzione del gradino per scalzamento al piede (un meccanismo simile fu descritto da Whittaker, 1982). La seconda fase è costituita dal meccanismo di "fissazione" dell'antiduna che risulta differenziato per le due granulometrie. Per il materiale più grossolano ($D_{max} = 64$ mm) i sedimenti di dimensione maggiore rimangono immobili, potendo essere mossi e migrare a valle in una nuova e stabile posizione solo se i piccoli grani di supporto vengono erosi. Le particelle più grandi vanno a costituire la cresta dell'antiduna, inglobando l'eventuale materiale lapideo proveniente da monte e completando la formazione dello step in un tempo piuttosto breve. Al contrario per il materiale con $D_{max} = 32$ mm tutte le frazioni granulometriche risultano mobili, le antidune sono maggiormente definite rispetto alla situazione precedente e tendono a fissarsi iniziando dalla parte a monte dell'antiduna.

I dati di laboratorio confermano che all'aumentare della portata aumenta considerevolmente la perdita energetica fino al completo disfacimento della regolarità iniziale del letto. Lo sviluppo di sequenze a step pool conduce ad una situazione di stabilità superiore a quella di partenza. La loro formazione comporta infatti, come effetto immediato, una riduzione del gradiente energetico e, come effetto collegato, un tasso di "corazzamento" del fondo dipendente in gran parte dalla composizione granulometrica del materiale e dalle condizioni di flusso.

Wohl e Grodek (1994) hanno sottolineato come il modello di formazione delle gradinate, supportato dalla teoria dell'antiduna, richieda che i clasti di grosse dimensioni dell'alveo rimangano completamente sommersi dai deflussi che determinano la

formazione della struttura stessa. Tale situazione non si è mai verificata nei tratti di collettore analizzati dai suddetti ricercatori nel bacino del Nahal Yael, Israele; pertanto i tratti a gradinata (boulder-step) sviluppati lungo i collettori principali e secondari non potrebbero essere spiegati facendo ricorso a tale modello teorico. Wohl e Grodek hanno proposto un modello alternativo nel quale l'instabilità del flusso, rappresentata dai piccoli salti idraulici e da fenomeni pulsanti e di diffusione turbolenta, provocherebbe una dissipazione di energia molto variabile ed irregolare, responsabile prima della segregazione e poi del corazzamento del letto. Le dimensioni, la scala e gli attributi di tale instabilità non sono stati specificati, ma possono, secondo gli autori, essere controllati e dedotti dalla pendenza dell'alveo.

Nonostante il modello delle antidune come meccanismo di formazione delle gradinate sia intuitivamente attraente, le osservazioni e le identificazioni effettuate da Wohl e Grodek, relative all'esistenza di strutture a gradinata (boulder-step) sviluppatasi in condizioni in cui non sono state mai completamente sommerse dall'acqua, minano in parte la sua credibilità. Partendo da tale presupposto, Abrahams *et al.* (1995) ipotizzano che la formazione degli step pool possa essere controllata da altri fenomeni e meccanismi idraulici. La linea di pensiero seguita dagli autori, anche sulla scorta di osservazioni di laboratorio presentate da altri ricercatori (WHITTAKER, JAEGGI, 1982), propone la teoria che l'aggiustamento e la configurazione finale delle strutture a gradinata sia tale da massimizzare la resistenza al flusso. Tale ipotesi è stata inizialmente formulata per corsi d'acqua a canali intrecciati in materiale ghiaioso e sabbioso da Davis e Sutherland (1980) e viene anche identificata nella letteratura scientifica come l'ipotesi della massimizzazione del fattore di resistenza, f , di Darcy Weisbach.

L'ipotesi di Abrahams *et al.* (1995), supportata da esperimenti di laboratorio e successivamente corroborata da ricerche di campagna, si basa sulle seguenti asserzioni:

18 a) l'arrangiamento e la disposizione delle

gradinate evolvono in modo tale da massimizzare la resistenza al flusso e, conseguentemente, tendono verso una massimizzazione della stabilità complessiva della struttura;

b) la resistenza al flusso viene massimizzata dove le perdite di carico totali attribuibili alla presenza degli step sono massime;

c) considerando l'altezza dei singoli gradini (H) costante, la perdita energetica è più elevata dove gli step sono regolarmente intervallati ed il rapporto $(H/L)/S$ risulta essere maggiore di 1 ($\overline{H/L}$ indica il valore medio per la sequenza del rapporto H/L).

In definitiva, più numerosi saranno gli step all'interno di un tratto, più elevata sarà la resistenza al flusso. Se la pedata del "gradino" fosse orizzontale, varrebbe la relazione: $\overline{H/L} = \sin \theta$ (fig. 4-a). Generalmente però la pedata negli step pool naturali non è orizzontale ma in leggera contropendenza (fig. 4-b). Anche questo fa sì che la perdita di carico dovuta alle gradinate risulti eccedente in confronto a quella di un corrispondente tratto di canale a pendenza costante.

Gli autori hanno eseguito quattro serie di test attraverso i quali sono pervenuti all'identificazione di una relazione che lega i parametri geometrici della morfologia a gradinata (altezza H e lunghezza d'onda L dei gradini) alla resistenza al flusso. Tale legame risulta essere variabile con la distanza intercorrente tra i gradini e dà luogo, a parità di portata, alla minima velocità media (quindi alla massima resistenza globale del tratto) quando: $1 < (\overline{H/L})/S < 2$.

Abrahams *et al.*, affiancando i dati di laboratorio a quelli ricavati dal rilievo di dieci torrenti montani nell'Adirondack Mountains (New York) e di otto nel Lake District (England), deducono mediamente la relazione:

$$(\overline{H/L}) = 1.5 S \quad (4)$$

Considerando invece, in una analisi di correlazione multipla, i soli dati di campagna, gli stessi autori ottengono:

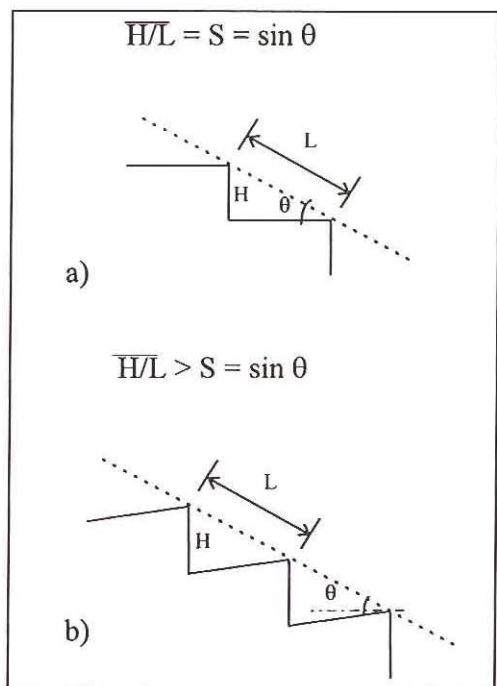


Fig. 4 - Schematizzazione del profilo longitudinale di una sequenza a gradinata: (a) profilo con pedata piatta; (b) profilo con pedata in contropendenza.

$$\overline{H/L} = 0.67 S^{0.682} \quad (5)$$

che risulta molto simile alla eq. (3) proposta da Wohl e Grodek (1994) per il bacino del Nahal Yael. La assenza della variabile H nella relazione (2) è imputabile secondo Abrahams *et al.* alla più modesta variazione di tale grandezza nei dati di Whittaker (1987) rispetto a quella che caratterizza i torrenti dell'Adirondack Mountains e del Lake District da lui considerati. Pertanto la relazione formale (1) viene interpretata come una versione ristretta delle più generali eq. (4) e (5).

Il quadro riassuntivo presentato sulla genesi e sui rapporti geometrici che caratterizzano gli step pool mette in luce alcune discordanze fra le ricerche compiute dai vari autori. Vi sono tuttavia tre aspetti fondamentali che emergono in modo evidente e che sembra opportuno richiamare:

- la presenza di sequenze a gradinata in un alveo torrentizio è un buon indicatore di

un assetto morfologico globalmente stabile e difficilmente alterabile da piene con tempo di ritorno inferiore ai 30 anni;

- l'ampiezza della gamma granulometrica del materiale d'alveo abbinata ad una pendenza media del canale di almeno il 3% è una condizione irrinunciabile perché questa struttura si sviluppi in natura in modo ben definito;
- la lunghezza d'onda degli step è inversamente proporzionale alla pendenza media del corso d'acqua mentre la loro altezza è comandata dalle granulometrie più grossolane presenti nel letto.

Caratterizzazione del bacino del Rio Cordon e della stazione di misura

Il Rio Cordon è un tipico corso d'acqua delle Dolomiti Orientali affluente in destra del torrente Fiorentina, affluente a sua volta del torrente Cordevole. Il bacino idrografico, chiuso in corrispondenza alla stazione sperimentale (fig. 5), drena una superficie di 5 km² e presenta una altezza media di 2200 m s.l.m.. Alcune delle principali caratteristiche del bacino sono riportate in tabella 3.

Le formazioni rocciose presenti sono costituite da Dolomie, che edificano i rilievi più elevati del bacino e da rocce del Gruppo di Wengen, qui costituite in prevalenza

Tab. 3 - Principali caratteristiche del bacino del Rio Cordon.

Area del bacino (km ²)	5
Quota media (m s.l.m.)	2200
Quota minima (m s.l.m.)	1763
Quota massima (m s.l.m.)	2748
Pendenza media (%)	52
Lunghezza del collettore principale (km)	2.84
Pendenza media del collettore fino allo spartiacque (%)	17
Precipitazione media annua (mm)	1100
Temperatura media annua (° C)	2

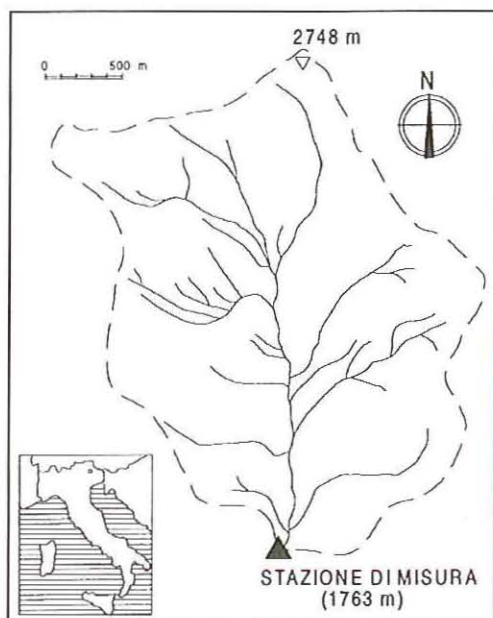


Fig. 5 - Corografia del bacino del Rio Cordon.

da conglomerati ad elementi vulcanici, jaloclastiti ed arenarie tufacee. Nella parte inferiore del bacino si ha anche una limitata presenza di rocce del Gruppo di Buchenstein, che comprendono diversi litotipi, in prevalenza di natura calcarea, calcareo-marnosa ed arenacea. Assai ampia è la presenza di depositi Quaternari, costituiti in prevalenza da materiale morenico detritico.

La copertura vegetale del bacino è costituita in prevalenza da cenosi erbacee, consistenti sia in praterie montane a copertura continua (43% del bacino), sia in cenosi lacunose (18%). Piuttosto diffuse sono anche le cenosi arbustive (18%), mentre popolamenti forestali, edificati da abete rosso e da larice, sono presenti solo nella parte inferiore del bacino e occupano il 7% della superficie complessiva dell'unità idrografica. Il 14% della superficie, infine, è privo di copertura vegetale.

I suoli presenti nel bacino, generalmente superficiali, sono stati suddivisi in tre famiglie principali: litosuoli, suoli organici di tipo AC e suoli con profilo orizzontale differenziato in tre orizzonti, ascrivibili alle terre brune.

Il regime dei deflussi è caratterizzato da portate elevate nei mesi di Maggio e Giugno, durante i quali si concentrano i fenomeni di fusione della neve, e da significativi eventi di piena nei mesi estivi in concomitanza di eventi meteorici di tipo temporalesco. Non mancano gli eventi di piena nel periodo autunnale, ma la collocazione altimetrica del bacino è tale che fin dall'autunno gran parte della precipitazione si verifica in forma solida.

Nel Rio Cordon le portate liquide e solide vengono misurate mediante un dispositivo automatico (LENZI *et al.* 1990; D'AGOSTINO, LENZI, 1996). La stazione di misura, già descritta e caratterizzata in lavori precedenti (FATTORELLI *et al.*, 1988; BILLI *et al.*, 1994, 1995; LENZI *et al.*, 1997), consta di un canale di imbocco seguito da un griglia fortemente inclinata, che consente la separazione del sedimento grossolano da quello fine, e da un piazzale di deposito del materiale grossolano. Al di sotto della griglia ha inizio un canale di restituzione della portata liquida intercettata dalla griglia. Al termine di questo canale si è recentemente provveduto alla costruzione di una vasca di sedimentazione e misura del materiale fine (D'AGOSTINO, LENZI, 1996; LENZI *et al.*, 1997). Il funzionamento della stazione si basa quindi sulla separazione del materiale solido grossolano trasportato al fondo dal sedimento fine in sospensione e dai deflussi liquidi.

L'evento di tipo straordinario del 14 Settembre 1994

Il funzionamento della stazione sperimentale ha permesso la misura dei deflussi liquidi e solidi di un evento di piena di tipo straordinario verificatosi il 14 Settembre 1994. Questo evento, caratterizzato da una durata complessiva di 12 ore e da un tempo di ritorno compreso tra i 30 e i 50 anni, è consistito in due onde di piena successive, la seconda delle quali ha raggiunto il valore al colmo di $10.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (fig. 6). I valori medi del numero di Froude, dello sforzo tangenziale medio e della "stream power" unitaria che sono stati stimati (per un tratto

d'alveo a monte della stazione) in concomitanza a tale valore di picco sono risultati rispettivamente pari a 1.7, 500 N m⁻² e 1800 watt m⁻².

La piena ha convogliato nel piazzale di accumulo un volume complessivo di materiale di 890 m³, manifestandosi con una intensità media di trasporto di oltre 300 m³ h⁻¹. È significativo sottolineare ad esempio come, per alcuni minuti, si siano raggiunti dei valori di trasporto solido grossolano di circa 530 kg s⁻¹ che, in termini di volume occupato nel piazzale di deposito a valle della griglia equivalgono a circa 1100 m³ h⁻¹.

Per l'intensità dei deflussi il Rio Cordon ha potuto disporre di una grossa alimentazione di sedimenti, provenienti, oltre che dai versanti, anche dalle sponde e dal letto del torrente.

L'inizio del trasporto di fondo è avvenuto per una portata liquida di 1.8 m³s⁻¹. In generale questo valore di portata critica si verifica sul Rio Cordon con una certa costanza, aggirandosi mediamente intorno ai 2 m³ s⁻¹. Il massimo valore di deflusso relativo all'evento del 1994 ha quindi superato di 5-6 volte tale limite. Nonostante la modesta permanenza delle portate liquide intorno al valore di picco (5-10 minuti), è stata mobilitata, in termini granulometrici, la quasi totalità del materiale superficiale d'alveo (D'AGOSTINO, LENZI, 1996).

Vanno infine menzionate l'elevata concentrazione di sedimento in sospensione (con punte di 58 g l⁻¹) e l'intensità delle precipitazioni che hanno raggiunto un valore massimo di 20.5 mm h⁻¹.

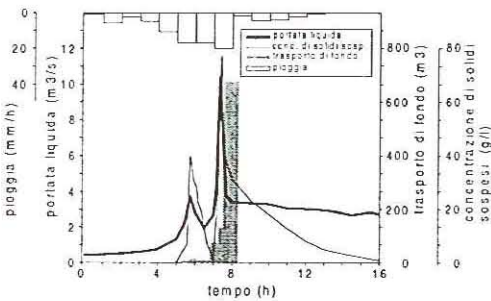


Fig. 6 - Evento di piena del 14 Settembre 1994: andamento delle portate liquide, del trasporto di fondo e del trasporto in sospensione misurati.

Un'analisi di campagna supportata da rilievi topografici ha permesso di constatare come, a seguito della piena del Settembre 1994, alcune sequenze a gradinata preesistenti alla piena siano state parzialmente o completamente distrutte e/o interritte dal sedimento fine, mentre altre sequenze si siano formate a monte di step pool già esistenti.

Alla luce delle teorie di formazione delle unità a gradinata presentate precedentemente, saranno di seguito descritte ed interpretate le principali modificazioni morfologiche verificatesi sul rio Cordon durante questa piena a carattere straordinario.

Caratterizzazione morfologica dell'alveo del torrente Cordon prima della piena del Settembre 1994

Durante l'anno 1993, cioè prima dell'evento di piena del Settembre 1994, il Rio Cordon è stato oggetto di alcune campagne di rilievi topografici, morfometrici e granulometrici per un tratto di complessivi 1500 m a monte della stazione sperimentale.

Il rilievo morfologico dell'asta torrentizia (BILLI *et al.*, 1994, 1995; D'AGOSTINO *et al.*, 1994; LENZI *et al.*, 1997) ha portato all'individuazione di tratti con caratteristiche differenziate: tratti d'alveo a gradinata (step-pool), tratti a rapide (riffle-pool) e tratti definiti di tipo "misto" (fig. 7), essendo questi ultimi caratterizzati da sequenze a gradinata irregolari o poco definite e frequentemente interrotte da accumuli disordinati di materiale grossolano.

Sono stati rilevati complessivamente otto tratti a gradinata (denominati in fig. 7: SP₁, SP₂, SP₃, SP₄, SP₅, SP₆, SP₇, SP₈) nei quali le sequenze risultano ben definite e regolari ed intervallate da tratti misti. Gli step sono costituiti dalla frazione granulometrica più grossolana presente in alveo con una altezza del salto dello stesso ordine del diametro massimo (nel Rio Cordon $D_{max} \approx 2-3 D_{90}$).

I tratti a gradinata sono i più stabili fra quelli rilevati nel Rio Cordon e sono suscettibili di variazioni morfologiche solo in occasione di eventi di piena di notevole en-

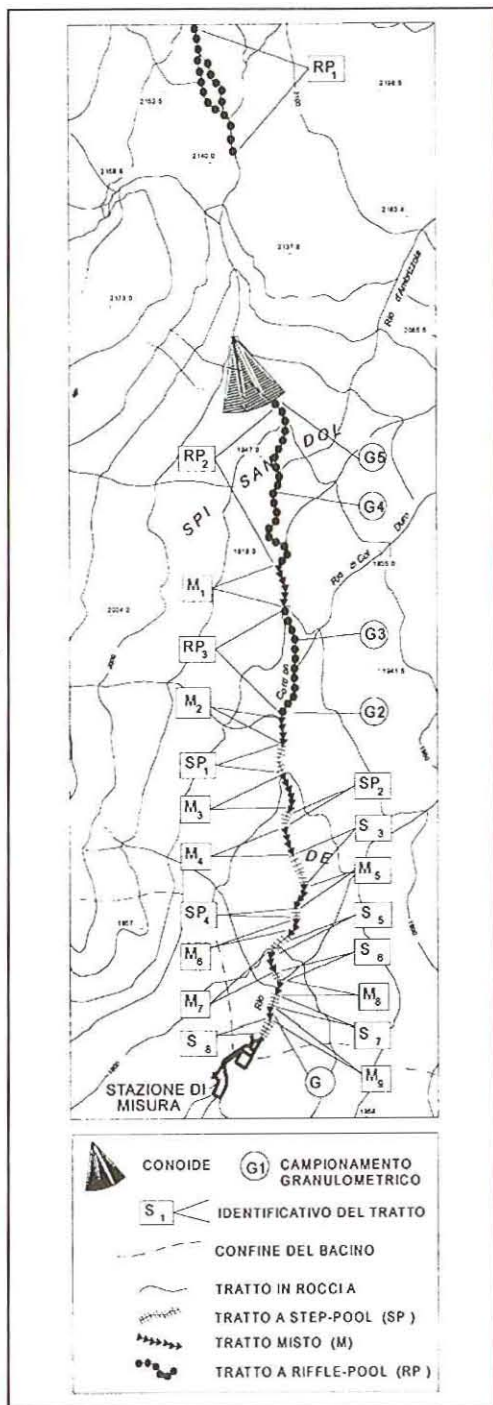


Fig. 7 - Caratterizzazione morfologica del Rio Cordon a monte della stazione sperimentale prima della piena del 14 Settembre 1994.

tità come quello del 14 Settembre 1994 (BILLI *et al.*, 1995; LENZI *et al.*, 1997).

I tratti misti ($M_1, M_2, M_3, \dots, M_9$ in fig. 7) sono invece il risultato dell'arresto quasi istantaneo del trasporto solido durante le fasi di recessione della piena. I sedimenti sembrano come "congelati" nella disposizione assunta durante la fase di trasporto. Ciò si è reso evidente sul campo osservando la totale assenza di una qualche selezione granulometrica spaziale e la coesistenza caotica nel letto di clasti dalle dimensioni più disparate. Sul Rio Cordon gli accumuli dei tratti misti assumono per lo più l'aspetto di barre longitudinali che dividono il flusso in due rami. Le barre, specie quelle localizzate in posizione centrale sulla sezione, costituiscono delle cospicue riserve di sedimento e, data la loro modesta organizzazione, possono essere facilmente rimobilizzate dalle successive piene.

Nei tratti d'alveo classificati come riffle-pool (RP_3, RP_2, RP_1 , fig. 7) il Rio Cordon scorre sui propri depositi alluvionali e ha un alveo di piena, inattivo, distinto da quello di magra attivo. I tratti d'alveo a riffle-pool presentano corpi sedimentari ben strutturati, come barre longitudinali e trasversali, che costituiscono aree di immagazzinamento del sedimento meno facilmente disponibili rispetto a quelle dei tratti misti. I riffle assumono frequentemente l'aspetto di rampe piuttosto allungate con una granulometria del materiale superficiale un po' meno grossolana di quella costituente gli step ma comunque caratterizzata da una scabrezza elevata.

Ad eccezione di una zona ristretta, limitata alla testata del bacino ed alla cascata in corrispondenza della soglia della scarpata principale (apice del "conoide" indicato in fig. 7), non vi sono nell'alveo del Rio Cordon affioramenti in roccia in posto, in quanto il torrente ha scavato il proprio tracciato in depositi quaternari detritico-morenici.

Il rilievo topografico delle sequenze a gradinata è avvenuta rilevando la successione dei punti caratteristici che delineano le unità fisiografiche: il punto di testa dello step, individuato in asse al filone principale della corrente immediatamente prima del salto, ed il

punto più profondo del pool di valle, individuato ricercando la massima erosione causata dal getto. Per gli step si è anche proceduto ad un rilievo della loro larghezza e della loro disposizione trasversale rispetto al flusso. A tal fine si sono rilevati in corrispondenza alle sponde i punti che indicano, approssimativamente, la larghezza assunta dal flusso in condizioni di piena straordinaria; questi punti si localizzano abbastanza agevolmente valutando il punto di "ammorsamento" dello step a ciascuna delle sponde.

Dal confronto del profilo longitudinale dei tratti a step pool con quello relativo all'intero tratto studiato (fig. 7) si è potuta determinare la successione delle pendenze medie fra sequenze a gradinata e successivi tratti misti a valle della sequenza (tab. 4, fig. 8). La pendenza media, di ben cinque delle otto sequenze a step pool rilevate, è risultata maggiore rispetto alla corrispettiva del tratto misto, in un caso il gradiente della sequenza a step pool è apparso coincidente con quello del relativo tratto misto ed infine in soli due casi (in prossimità della stazione) la pendenza della zona mista è risultata superiore a quella della sequenza a gradinata. Ciò denota una più accentuata propensione all'intercettazione del sedimento del tratto misto, il quale esibisce nel complesso pendenze medie minori rispetto alla sequenza a step pool antecedente. Nel suo complesso il profilo longitudinale del torrente Cordon si

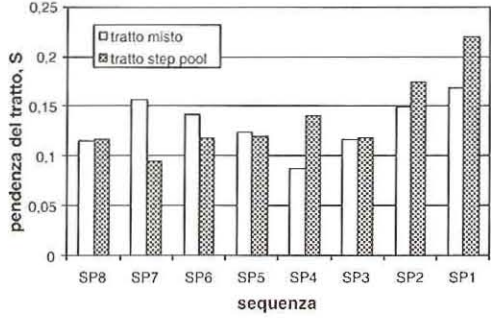


Fig. 8 - Andamento delle pendenze per tratti morfologicamente omogenei.

presenta piuttosto regolare, con variazioni di pendenza generalmente modeste. Ciò nonostante è possibile osservare che le sequenze a gradinata si originano soprattutto nelle zone a gradiente maggiore. Calcolando la media delle pendenze dei due tratti a diversa morfologia, si ottiene infatti un valore del 13,8% per gli step pool e un valore del 13,2% per i tratti misti.

Per la valutazione della granulometria del materiale superficiale dell'alveo si sono condotti cinque rilievi granulometrici (siti G1-G5 indicati in fig. 7) con la metodologia del "grid by number" modificata (LENZI, MARCHI, 1988; LENZI, 1992) per poi desumere un'unica curva granulometrica (Gm) che media il fuso granulometrico delle cinque osservazioni (tab. 5, fig. 9).

Nella tabella 6 si riporta una sintesi dei parametri geometrici delle sequenze a gradinata rilevate, riportandone i valori medi a sequenza per sequenza.

Tab. 4 - Pendenza del Rio Cordon a monte della stazione sperimentale: pendenza dei tratti a step pool e dei corrispondenti tratti misti a valle.

Sequenza	Pendenza tratto 'misto' a valle degli step pool	Pendenza tratto step pool
SP ₈	0.1158	0.1167
SP ₇ - M ₉	0.1572	0.0942
SP ₆ - M ₈	0.1423	0.1187
SP ₅ - M ₇	0.1241	0.1200
SP ₄ - M ₆	0.0867	0.1407
SP ₃ - M ₅	0.1164	0.1180
SP ₂ - M ₄	0.1498	0.1739
SP ₁ - M ₃	0.1691	0.2207

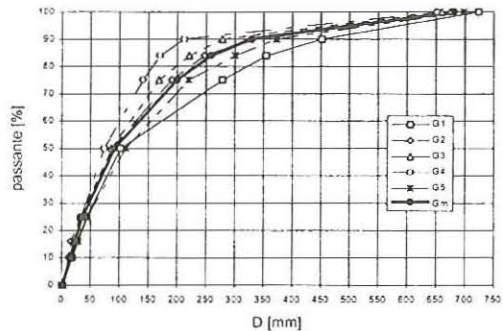


Fig. 9 - Curve granulometriche del materiale superficiale del Rio Cordon: rilievi anteriori all'evento del 14 Settembre 1994.

Tab. 5 - Diametri caratteristici desunti dai rilievi granulometrici (Rio Cordon).

Campione	Tratto	D_{10} (mm)	D_{16} (mm)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{90} (mm)	D_{medio} (mm)
G1	M ₉	19.00	27.90	102.80	355.30	452.40	145.30
G2	RP ₃	11.80	16.30	86.40	247.40	331.20	122.20
G3	RP ₃	17.00	21.00	87.10	221.50	279.20	123.20
G4	RP ₂	14.30	23.00	74.10	170.90	212.80	104.70
G5	RP ₂	19.00	29.20	111.20	300.90	372.60	157.20

Tab. 6 - Valori medi dei parametri morfologici relativi alle 'sequenze' a step pool.

Seq.	<i>n.</i>	<i>LT(m)</i>	<i>B(m)</i>	<i>Z(m)</i>	<i>H(m)</i>	<i>Lp (m)</i>	<i>Ls (m)</i>	<i>S</i>
SP ₁	8	39.61	6.596	1.063	1.283	5.507	5.659	0.2207
SP ₂	4	13.38	4.760	0.777	1.053	4.500	4.460	0.1739
SP ₃	10	58.73	6.188	0.770	1.004	6.617	6.525	0.1180
SP ₄	4	19.25	6.227	0.903	1.1567	4.925	6.417	0.1407
SP ₅	7	25.33	4.956	0.507	0.850	4.210	4.222	0.1200
SP ₆	4	11.85	4.867	0.470	0.827	4.123	3.950	0.1187
SP ₇	3	12.95	6.120	0.610	0.655	6.540	6.475	0.0942
SP ₈	6	26.13	5.917	0.610	0.846	5.054	5.226	0.1167

Legenda tab. 6 (vedi anche fig. 2-a)

Seq.: codice identificativo sequenza a step pool

n.: numero di step costituenti la sequenza

LT: lunghezza totale della sequenza

B: larghezza dell'alveo in corrispondenza degli step: valore medio per sequenza

Z: dislivello medio fra step e step a monte

H: dislivello medio fondo pool step di monte

Lp: distanza media (lunghezza d'onda) pool-pool

Ls: distanza media (lunghezza d'onda) step-step, $L_s = L$

S: pendenza media della sequenza

I parametri geometrici riportati in tabella 6 hanno messo in luce alcuni interessanti legami fra gli elementi caratterizzanti le unità morfologiche a gradinata. Essi sono di seguito sintetizzati.

- a) La lunghezza d'onda pool-pool (*Lp*) è praticamente coincidente con la lunghezza d'onda step-step (*Ls*). La sequenza a gradinata appare quindi intrinsecamente simmetrica, in quanto la distanza intercorrente fra la cresta di uno step ed il pool di valle tende a rimanere invariata all'interno di una sequenza. Risulta infatti $L_s = 1.03 L_p$ (coefficiente di correlazione $r = 0.86$). I valori delle lunghezze d'onda fra gli step (od i pool) manifestano nel complesso un campo di variazione abbastanza limitato: 4-6.5 m.
- 24 b) La larghezza media degli step è legata

alla lunghezza d'onda degli step attraverso la relazione: $B = 1.05 L_s$; il coefficiente di correlazione risulta peraltro non molto soddisfacente ($r = 0.55$).

- c) La altezza media degli step di ciascuna sequenza è direttamente proporzionale al gradiente medio del tratto interessato dagli step ($H = 6.8 S$, con *H* in m, *S* in m/m e coefficiente di correlazione $r = 0.69$). Anche la altezza degli step, come la lunghezza d'onda, risulta contenuta in un range di valori abbastanza limitato 0.65-1.28 m.
- d) La lunghezza d'onda *Ls* cresce al crescere del rapporto *H/S*. I dati di tabella 6 vengono interpretati dalla espressione: $L_s = 0.77 (H/S)$, avente $r = 0.56$; al crescere del salto, a parità di gradiente medio del letto, gli step tendono quindi ad allontanarsi. È palese in questo caso la

similitudine esistente fra gli step pool e la collocazione delle tradizionali opere di consolidamento. Da semplici considerazioni di tipo geometrico sulla relazione ottenuta, come pure dai dati di tabella 6, si deduce che il tratto d'alveo compreso fra il fondo di un pool e la testa del successivo step di valle, risulta costantemente in condizioni di contropendenza.

Caratterizzazione morfologica del torrente a seguito dell'evento di piena del 14 Settembre 1994

Nell'agosto 1995, in conseguenza degli evidenti cambiamenti morfologici avvenuti dopo l'ondata di piena del Settembre 1994, si è ripetuto il rilievo topografico delle sequenze a gradinata precedentemente descritte. Complessivamente il tratto misurato si estende per una lunghezza di 700 m a monte della stazione sperimentale. Le operazioni di campagna sono state svolte con dettaglio, ricercando la posizione dei punti caratteristici precedentemente battuti per la descrizione della geometria e del profilo delle sequenze a step pool. In tal modo si sono potuti sovrapporre al meglio i profili longitudinali del torrente anteriori e posteriori all'evento di piena, rendendo possibile un'obiettivo valutazione delle modificazioni d'alveo. Si è provveduto al rilievo delle vecchie sequenze a gradinata, tre delle quali sono risultate completamente distrutte (tab. 7), e di altre quattro unità morfologiche a step pool di nuova formazione. Tre di queste sono localizzate subito a monte delle vecchie sequenze denominate con le sigle SP_1 , SP_2 , SP_6 e vengono pertanto identificate dalle sigle N_1 , N_2 , N_6 , mentre la rimanente si trova a valle della sequenza SP_3 e viene identificata con la sigla N_4 . La neoformazione delle quattro sequenze a step pool è avvenuta su tratti precedentemente identificati come tratti misti (M_2 , M_3 , M_5 , M_7).

Le misurazione delle pendenze dei singoli tratti (tab. 7), ha consentito di valutare la variazione del gradiente medio a seguito dell'evento di piena verificatosi.

Delle dodici sequenze complessivamente analizzate prima e dopo l'evento (N_1 - M_2 , SP_1 ,

N_2 - M_3 , SP_2 , SP_3 , N_4 - M_5 , SP_4 , SP_5 , N_6 - M_7 , SP_6 , SP_7 , SP_8), ben sette (N_1 - M_2 , N_2 - M_3 , SP_2 , N_4 - M_5 , SP_4 , N_6 - M_7 , SP_8) evidenziano una superiore pendenza media dopo la piena (fig. 10), in un caso la pendenza della sequenza è circa equivalente alla precedente (SP_3) ed infine in solo quattro casi (SP_7 , SP_6 , SP_5 , SP_1) la pendenza misurata prima dell'evento di piena risulta essere più elevata.

Le configurazioni a step pool di nuova formazione presentano una pendenza media leggermente superiore a quella dei tratti misti di origine (fig. 10) ed indicano che lo sviluppo di una gradinata all'interno di un tratto misto tende ad indurre un incremento locale della pendenza. Inversamente la distruzione dei tratti a step pool sembra dar luogo ad una riduzione della pendenza locale (tratti SP_6 , SP_5 , fig. 10) o comunque ad una variazione poco rilevante (tratto SP_3). Il legame fra le unità a step pool ed i tratti in cui il torrente manifesta le pendenze medie più elevate si sono d'altra parte già evidenziati attraverso i rilievi condotti anteriormente alla piena del Settembre 1994.

Considerando l'importanza rivestita dalle distribuzioni granulometriche nella valutazioni della dinamica d'alveo, si sono ef-

Tab. 7 - Pendenza dei tratti a step pool dopo la piena del Settembre 1994: tratti di nuova formazione (N_1 , N_2 , N_4 , N_6) e tratti (SP_{1-8}) già rilevati anteriormente all'evento. In grassetto sono evidenziate le sequenze SP_3 , SP_5 , SP_6 che non sono più risultate del tipo a step pool dopo l'evento.

Sequenza	Pendenza tratto
SP_8	0.159
SP_7	0.046
SP_6	0.036
N_6	0.157
SP_5	0.103
SP_4	0.210
N_4	0.146
SP_3	0.122
SP_2	0.198
N_2	0.183
SP_1	0.201
N_1	0.223

fettuate delle nuove analisi granulometriche in sette aree campione, utilizzando la metodologia del "grid by number" già adottata per i rilievi anteriori al Settembre 1994. Di queste sette aree, quattro (G1', G2', G3', G4') sono situate all'incirca nella medesima posizione delle misurazioni realizzate prima del 1994, mentre le altre tre, indicate con la sigla G-SP₃, G-SP₇/N₆ e G-SP₂, si trovano rispettivamente: a monte del primo step della sezione SP₃, fra le sezioni SP₇ e N₆, ed a valle del tratto SP₂.

Per ogni zona rilevata si sono poi calcolati i diametri più significativi della distribuzione granulometrica (tab. 8).

La granulometria d'alveo rilevata dopo la piena è complessivamente composta da una matrice più grossolana in tutti i suoi parametri più rappresentativi. Ciò è facilmente riscontrabile nelle figure 9 e 11 nonché nelle tabelle 5 e 8. Il confronto risulta ancora più diretto ricorrendo alle due curve granulome-

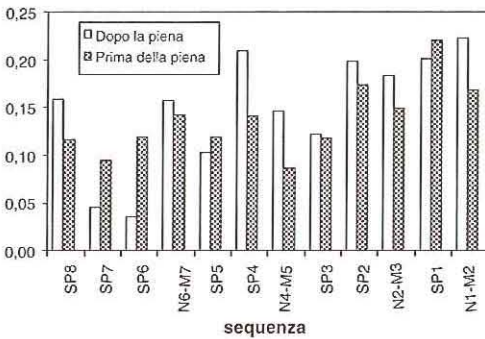


Fig. 10 - Confronto tra le pendenze medie dei tratti a gradinata e misti prima e dopo l'evento di piena del Settembre 1994.

triche che mediano i due set di campionamenti eseguiti prima e dopo l'evento (fig. 12). In figura 12 si può anche rilevare come, nonostante la variazione abbastanza marcata verso componenti più grossolane, il diametro massimo (D_{100}) abbia subito un cambiamento quasi trascurabile e molto contenuto rispetto alle altre frazioni. L'aumento generale della granulometria può essere attribuito alla mobilitazione di notevoli quantità di materiale grossolano, proveniente da una parte dai processi di erosione di sponda e di versante e dall'altra dalla rottura degli step e dalla migrazione verso valle di parte degli accumuli disordinati di materiale presenti nei tratti misti.

Nella tabella 9 viene riportata l'elaborazione dei parametri geometrici medi dedotti dal rilievo di ciascuna delle sequenze rilevate in campo. Analogamente alla procedura già seguita per le sequenze rilevate prima dell'evento, si sono potute ottenere alcune relazioni che legano questi elementi geometrici (si è esclusa da questa analisi la sequenza SP₇ poiché costituita da un unico step pool).

- La lunghezza d'onda pool-pool (L_p) coincide con la lunghezza d'onda step-step (L_s), confermando l'intrinseca simmetria della unità morfologica; risulta infatti $L_s = 1.04 L_p$, con coefficiente di correlazione $r = 0.79$.
- La larghezza media degli step è ancora legata alla lunghezza d'onda degli step: $B = 0.87 L_s$, con $r = 0.63$. Pur essendosi incrementata, rispetto a prima dell'even-

Tab. 8 - Diametri caratteristici desunti dai rilievi granulometrici condotti dopo l'evento del 1994 (Rio Cordon).

Campione	D_{10} (mm)	D_{16} (mm)	D_{50} (mm)	D_{84} (mm)	D_{90} (mm)	D_{medio} (mm)
G1'	76.5	100.7	287.8	581.7	666.3	283.8
G2'	69.7	83.4	186.2	401.8	479.0	209.9
G3'	61.0	69.3	134.8	252.9	289.8	151.2
G4'	66.7	86.1	193.1	395.3	471.2	221.0
G-SP ₃	82.6	104.1	189.5	402.5	484.7	231.7
G-SP ₇ /N ₆	47.5	59.8	132.2	348.6	456.0	190.9
G-SP ₂	46.6	53.3	99.5	230.0	346.5	144.3

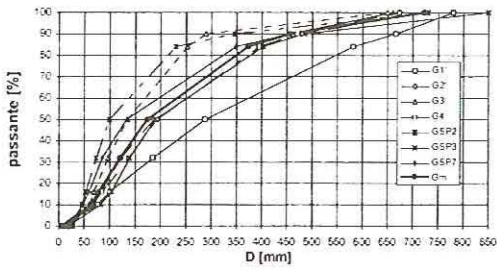


Fig. 11 - Curve granulometriche del materiale superficiale del Rio Cordon: rilievi posteriori all'evento del 14 Settembre 1994.

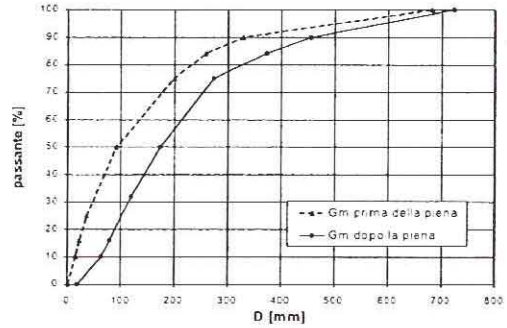


Fig. 12 - Curve granulometriche medie (Gm) anteriori e posteriori all'evento del 14 Settembre 1994.

to, sia la larghezza degli step sia la loro lunghezza d'onda, il valore di B rapportato ad L_s si è ridotto del 17%.

- c) La altezza media degli step di ciascuna sequenza rimane proporzionale al gradiente S della sequenza: $H = 5.6 S$, con $r = 0.65$. Non vi è una grossa variazione rispetto alla relazione determinata prima dell'evento ($H = 6.8 S$), tuttavia l'altezza degli step rapportata alla pendenza, ha subito un lieve decremento.
- d) La lunghezza d'onda L_s rimane proporzionale al rapporto H/S : $L_s = 1.27 (H/S)$, avente $r = 0.75$. La relazione può anche scriversi nella forma: $H/L_s = 0.788 S$, dalla quale si deduce che, a differenza di quanto riscontrato prima dell'evento ($H/L_s = 1.29 S$), i tratti d'alveo compresi fra

il fondo di un pool e la testa del successivo step non sono più in contropendenza.

Una sintesi ancor più generale sulle principali variazioni prodottesi sulle sequenze a step pool dopo l'evento è riportata in tabella 10. In essa sono sintetizzati i principali elementi geometrici ottenuti mediando i valori medi di tabella 9 e tabella 6 per le due serie di sequenze.

La larghezza media dell'alveo in corrispondenza agli step è aumentata, esibendo un incremento medio complessivo dell'ordine di un metro (tab. 10). Questo dato conferma il fenomeno di erosione di sponda che, oltre ad avere un ruolo significativo nell'introduzione di sedimenti in alveo, ha consentito in alcuni tratti un parziale adattamento laterale del canale, favorendo così

Tab. 9 - Valori medi dei parametri morfologici relativi alle "sequenze" a step pool: rilievi eseguiti dopo l'evento di piena del Settembre 1994 (per la legenda si veda la tab. 6).

Seq.	n'	n	$LT(m)$	$B(m)$	$Z(m)$	$H(m)$	$L_p(m)$	$L_s(m)$	S
N_1	7	-	40.80	7.992	1.290	1.278	6.651	6.800	0.223
SP_1	4	8	18.95	5.623	1.147	0.940	6.334	6.317	0.201
N_2	3	-	16.21	7.300	0.775	1.025	8.880	8.105	0.183
SP_2	3	4	11.19	5.010	1.045	0.940	5.535	5.595	0.198
N_4	3	-	12.45	4.690	0.470	0.485	6.760	6.225	0.146
SP_4	2	4	12.78	7.050	2.150	1.930	7.980	11.030	0.210
N_6	4	-	13.51	5.194	0.514	0.754	4.820	4.503	0.157
SP_7	1	3	7.56	8.190	0.350	0.810	10.790	7.560	0.046
SP_8	3	6	12.86	7.215	0.865	0.675	6.000	6.430	0.159

n' : numero di step della sequenza dopo la piena

n : numero di step della sequenza prima della piena

Tab. 10 - Confronto tra i valori medi dei parametri geometrici delle strutture a gradinata, prima e dopo l'evento di piena del 14 Settembre 1994.

Parametri geometrici	Lunghezza d'onda degli step L_s (m)	Lunghezza d'onda dei pool L_p (m)	Larghezza dell'alveo B (m)	Altezza degli step H (m)
Prima della piena del 14.09.1994	5.37	5.18	5.70	0.96
Dopo la piena del 14.09.1994	6.95	7.08	6.47	0.98
Variazione	+1.58	+ 1.90	+ 0.77	+0.02

la formazione di barre longitudinali.

La media delle altezze degli step si è mantenuta molto prossima ad 1 m sia prima che dopo l'evento di piena. Non essendosi registrate variazioni significative relativamente alla granulometria massima (fig. 12), viene confermato ancora una volta come la altezza delle gradinate trovi il suo limite superiore nella dimensione massima del materiale presente nel torrente.

La lunghezza d'onda media delle sequenze, valutata sia rispetto agli step che rispetto ai pool, è risultata il parametro che ha subito la variazione più sensibile, facendo registrare un incremento medio dell'ordine dei 2 m (tab. 10).

Evoluzione e trasformazione dei profili a gradinata

La sovrapposizione ed il confronto tra i profili longitudinali e le planimetrie rilevate nel torrente Cordon prima e dopo la piena del 14 Settembre 1994 hanno permesso l'individuazione e la caratterizzazione dei principali cambiamenti morfologici d'alveo. Le mutazioni indotte dalla piena si identificano nell'interrimento e nella disaggregazione, parziale o totale, di molti step pool. Quest'ultimo aspetto, in particolare, si configura di notevole interesse per la quasi totale assenza nella letteratura scientifica di osservazioni in campo relative ai processi ed alla dinamica di distruzione di questa unità morfologica.

In alcuni tratti del collettore, simultaneamente alla distruzione delle strutture a gra-

dinata, ha avuto inizio un processo di riarrangiamento del letto con la neoformazione di quattro nuove sequenze (N_1 , N_2 , N_3 , N_6). Vengono di seguito analizzate singolarmente le modificazioni morfologiche avvenute nelle principali sequenze.

Sequenza SP_1 : è caratterizzata dalla scomparsa di tre degli otto step pool rilevati in passato (fig. 13) e dalla formazione di vaste zone d'accumulo laterali. Tale trasformazione è conseguenza della traslazione a valle del materiale precedentemente depositato nel tratto misto (M_2) di monte. Il tratto misto si è così riarrangiato dando forma ad una regolare e ben definita configurazione a gradinata (nuova sequenza N_1). Nella parte più a valle della sequenza (a monte dell'ultimo step) è presente un tratto a rifille lungo circa 15 metri, contornato da ampie aree di accumulo laterali.

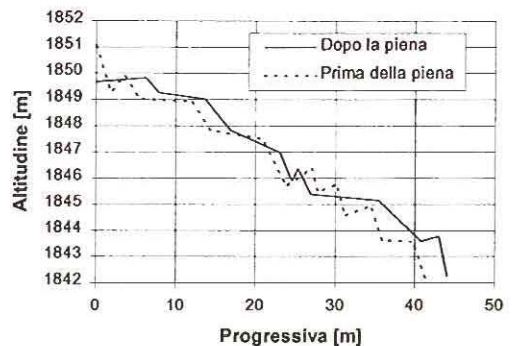


Fig. 13 - Profilo longitudinale della sequenza SP_1 .

Sequenza SP_3 : era composta, prima della piena, da quattro step pool (fig. 14); attualmente ne sono presenti solo tre. Uno degli

step si è forse disaggregato e successivamente addossato alle compagini limitrofe di valle. Sembra prevalere una tendenza alla migrazione verso valle delle gradinate.

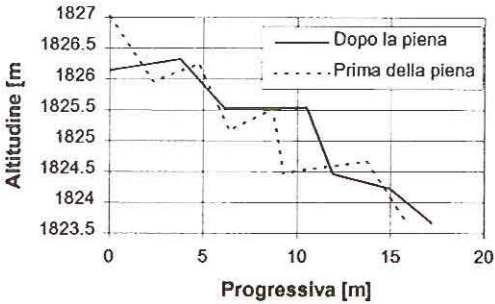


Fig. 14 - Profilo longitudinale della sequenza SP_2 .

Sequenza SP_3 : rappresenta una situazione di particolare interesse; infatti questo tratto è stato oggetto di un radicale cambiamento morfologico, passando da una tipica geometria a gradinata ad un'altra composta da due lunghi riffle (di 17 e 21 m) intervallati da due grossi step pool (fig. 15). Attenendosi ai risultati di laboratorio e ai dati ottenuti dalle osservazioni di campo svolte da Judd (1964), Hayward (1980), Whittaker (1987) e Humborg (1995), la suddetta trasformazione strutturale dovrebbe essere coadiuvata da una perdita di pendenza, che non si è però verificata. I gradienti presenti e passati del tratto in esame sono praticamente equivalenti.

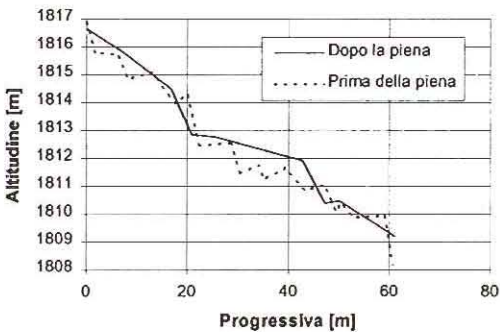


Fig. 15 - Profilo longitudinale della sequenza SP_3 .

Sequenza SP_4 : in questa zona il processo erosivo ha dominato, contribuendo alla rottura laterale ed al conseguente avanzamento ed allungamento dello step situato più a monte. Il materiale eroso è andato accumulandosi

nella sequenza sottostante (SP_5). Il profilo longitudinale in linea tratteggiata (fig. 16) evidenzia come prima della piena questa sequenza fosse composta da step piuttosto ravvicinati.

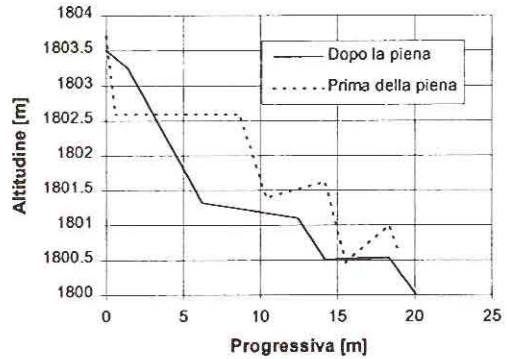


Fig. 16 - Profilo longitudinale della sequenza SP_4 .

Sequenza SP_5 : gli step pool qui presenti sono stati in gran parte interrati (fig. 17). Il canale si è spostato notevolmente verso la sponda destra (orografica), comportando un'evidente erosione della stessa, mentre l'alveo ha assunto una configurazione più vicina ai riffle pool con presenza di barre laterali.

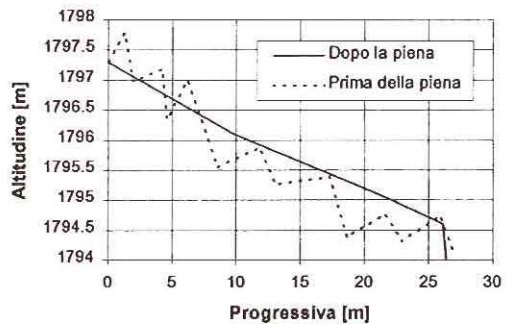


Fig. 17 - Profilo longitudinale della sequenza SP_5 .

Sequenza SP_8 : la passata morfologia d'alveo è stata completamente alterata dall'elevato processo erosivo e dal sorprendente trasporto solido che ha visto la mobilitazione di massi con diametri nell'ordine di $0.5 \div 1.0$ m. Questi ultimi si sono poi depositati nuovamente in modo caotico senza alcun segno di selezione granulometrica ed hanno forma-

to delle vaste zone di accumulo al centro e ai bordi del canale. Le modificazioni strutturali sono dunque tali da rendere addirittura difficilmente individuabile la sequenza stessa. I sei step pool che costituivano la sequenza prima della piena (fig. 18) sono stati quasi completamente distrutti; solo alcuni grossi clasti, situati all'incirca nelle precedenti posizioni, ne testimoniano la passata esistenza.

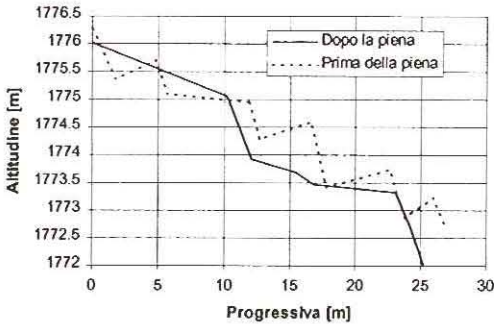


Fig. 18 - Profilo longitudinale della sequenza SP₈.

I confronti sopra riportati costituiscono evidentemente solo un esempio di alcune delle trasformazioni occorse a seguito di un evento di piena di tipo straordinario. Esse consentono tuttavia di inquadrare in modo abbastanza soddisfacente le possibili modalità evolutive di un tratto a step pool, la cui stabilità si mantiene fino a che la portata del corso d'acqua è inferiore alla portata "competente" a mobilitare i massi costituenti gli step. Al verificarsi di questa condizione si possono ipotizzare differenti trasformazioni morfologiche tipo:

- gli step costituenti la sequenza si distruggono o si alterano sensibilmente per rimozione dei massi che li collegano alle sponde (aggiramento laterale dello step) e/o per un processo di sottoescavazione a valle (scalzamento dello step);
- l'intera sequenza a step pool può traslare quasi simmetricamente verso valle con una qualche alterazione della lunghezza d'onda caratteristica;
- alcuni step, specie quelli di minore altezza, possono scomparire migrando verso valle ed andando ad accorparsi al successivo step di valle;

- parte o tutta la sequenza può trasformarsi o in tratti a riffle pool o in tratti misti con profilo di fondo spianato; nel primo caso si verifica un allungamento consistente della lunghezza d'onda caratteristica, nel secondo, che è predisposto da una forte alimentazione di sedimenti dal tratto immediatamente a monte, si ha in genere un "seppellimento" delle gradinate per progressivo interrimento dei pool.

Interpretazione dei risultati e conclusioni

Abrahams *et al.* (1995) hanno sostenuto l'ipotesi che le morfologie a gradinate nei torrenti montani possano essere la conseguenza della naturale tendenza dei corsi d'acqua alla massimizzazione della resistenza al flusso. Gli Autori hanno trovato che la resistenza al flusso è massimizzata quando il quoziente tra il valore medio del rapporto fra le altezze delle gradinate (H) di una sequenza e la loro lunghezza d'onda (L) si attesta fra valori estremi compresi fra 1 e 2 volte la pendenza media (S) del tratto, con un valore medio più probabile di 1.5. Assumendo il valore medio di H/S (denominato anche "steepness") pari al rapporto dei valori medi di H ed S , la relazione di Abrahams viene confermata dai dati delle unità a step pool del Rio Cordon rilevati anteriormente all'evento del Settembre 1994 (fig. 19). Considerando invece i valori dei parametri geometrici medi degli step pool misurati dopo la piena, compresi quelli relativi alle quattro sequenze di nuova formazione, questi si scostano visibilmente dal modello di massima resistenza, poiché i valori del rapporto H/L risultano essere frequentemente minori di S (fig. 19). Attraverso il fitting dei dati di tabella 6 e tabella 9 si è infatti determinato il passaggio dalla relazione $H/L = 1.3 S$, prima della piena, alla relazione $H/L = 0.8 S$ dopo la piena (fig. 20). Poiché per almeno i 15 anni antecedenti all'evento del 14 Settembre 1994 (con una portata al colmo di $10.4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) non si sono verificate nel Rio Cordon piene della stessa eccezionalità ma solo eventi con tempo di ritorno non superiore ai 5 anni e

portate al colmo non eccedenti i $5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, può verosimilmente avanzarsi l'ipotesi che la condizione di massima resistenza venga raggiunta in modo graduale e per effetto di una progressiva "ripulitura" dell'alveo operata da eventi di piena di tipo ordinario. Al contrario, al manifestarsi di un evento eccezionale, di breve durata, di tipo piuttosto impulsivo ("flash flood") ed in grado di distruggere e riformare le sequenze a step pool, la morfologia a gradinata sembra discostarsi dalla condizione di massima resistenza, venendo condizionata da una forte alimentazione di sedimenti. A sostegno di questa ipotesi depone anche il fatto che le strutture a gradinata rilevate dopo il Settembre 1994 non hanno mostrato una morfologia così distinta ed ordinata come quelle rilevate prima della piena. Verosimilmente, per raggiungere di nuovo sul torrente Cordon una situazione prossima alla massimizzazione della resistenza al flusso ($H/L = 1.5 S$) e simile a quella misurata prima della piena del 1994, dovranno sus-

seguirsi un numero consistente di piene ordinarie in grado di incrementare la steepness (H/L) ripulendo i pool dal sedimento fine accumulatosi.

L'evento di piena eccezionale del 14 Settembre 1994, che ha un tempo di ritorno compreso tra 30 e 50 anni, ha anche comportato uno "stiramento" della morfologia a gradinata. Il torrente ha presentato una altezza media degli step coincidente con quella misurata prima della piena ed una lunghezza d'onda media decisamente superiore. Questa è aumentata di 1.9 m per i pool e di 1.6 m per gli step (tab. 10). I rilievi condotti confermano le indicazioni fornite dalle prove di laboratorio di Whittaker e Jaeggi (1982) e da Whittaker (1987), che mettono in luce sia una certa stabilità delle strutture a step pool per piene con tempo di ritorno fino a 30-40 anni, sia una tendenza di queste sequenze, per deflussi ancora più intensi, a distruggersi per riformarsi in differenti tratti dell'alveo o a trasformarsi parzialmente. La variazione di lunghezza d'on-

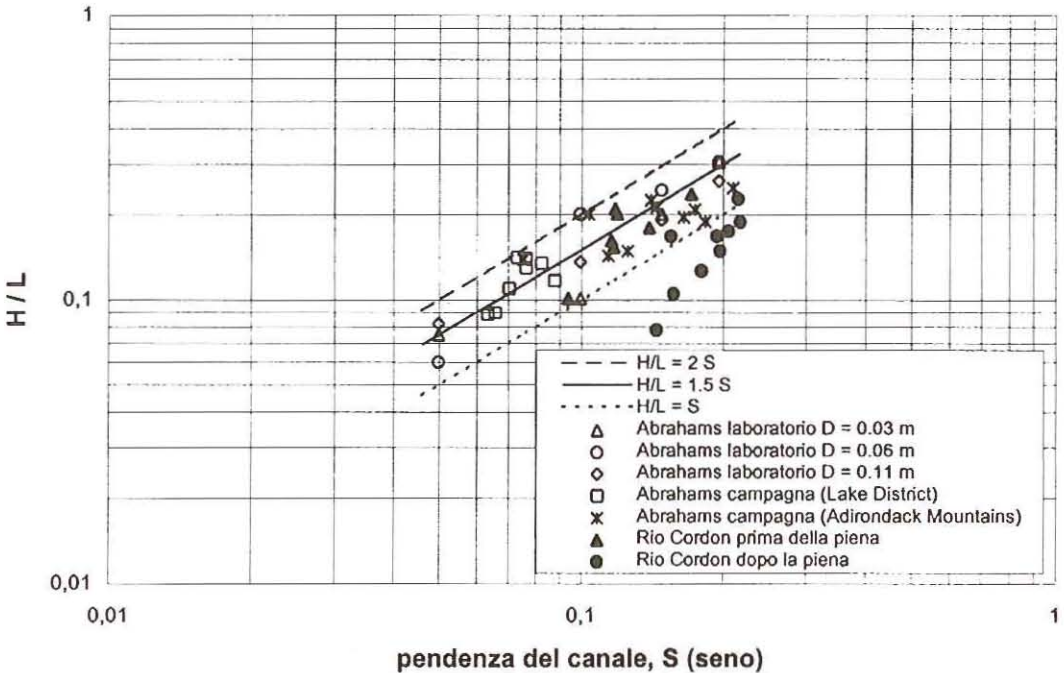


Fig. 19 - Relazioni tra il rapporto H/L e la pendenza S del tratto a step pool: dati di campo e di laboratorio presentati da Abrahams *et al.* (1995) confrontati con i dati del Rio Cordon.

da, avvenuta su di uno stesso torrente e senza variazioni sostanziali del suo gradiente idraulico, induce anche a considerare con qualche cautela le espressioni che determinano la lunghezza d'onda in funzione della sola pendenza (eq. (1)-(2)) o della pendenza e della altezza dello step (eq. (3)). Esse esprimono, infatti, più la schematizzazione di un particolare momento "storico" del torrente studiato che una tendenza evolutiva assoluta della struttura a gradinata. È invece assai più probabile che le lunghezze d'onde attese delle sequenze a step pool si collochino entro un campo di valori entro il quale varino proporzionalmente alla entità delle diverse portate formative che le hanno generate (fig. 20).

Alcuni ricercatori (ASHIDA *et al.*, 1984; GRANT, MITSUMAYA, 1991; GRANT, 1994; WHITTAKER, 1987) hanno affermato che la morfologia a gradinata trae origine dalla formazione di antidune in fase con un'onda superficiale stazionaria, mentre altri autori, fra cui Whol e Grodeck (1994) nonché Abrahams *et al.* (1995), hanno messo in dubbio la teoria di formazione delle gradinate associata alle antidune. Questi ultimi riportarono i dati ricavati dalle esperienze di laboratorio nel diagramma di Kennedy (1963), che, correlando il numero di Froude (Fr) della corrente con il numero d'onda ($kh = 2\pi h/L_b$, con h profondità media del flusso e L_b lunghezza d'onda delle anti-

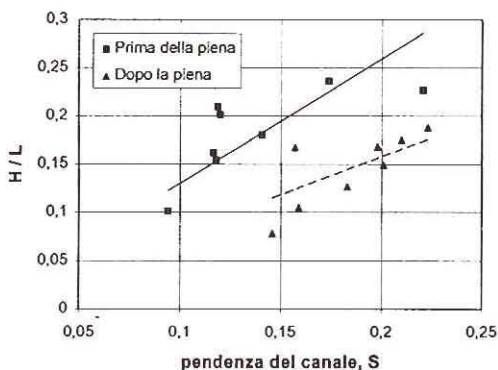


Fig. 20 - Relazione tra il rapporto H/L e la pendenza S del tratto a step pool per il Rio Cordon: confronto tra i dati anteriori e posteriori all'evento di piena del 14 Settembre 1994.

dune), permette di individuare il campo di formazione delle antidune. I dati riportati dagli autori in questo diagramma non trovarono collocazione entro, o comunque in stretta vicinanza, del dominio delle antidune.

I dati di campagna rilevati sul torrente Cordon relativi alla piena del Settembre 1994 hanno permesso di associare la lunghezza d'onda media degli step pool ($L_b = L_s \cong L_p \cong 7$ m, tab. 10) con la velocità media della corrente ($V = 3.37$ m s⁻¹) ed il tirante medio ($h = 0.4$ m) occorsi in corrispondenza del colmo di portata ($Q_p = 10.4$ m³ s⁻¹). Questi valori, riportati nel grafico di Allen (1982) (fig. 21), che comprende oltre che i risultati di Kennedy anche le indagini di altri ricercatori, fanno ricadere l'evento di formazione degli step pool nel campo delle antidune ($Fr = 1.7$, $kh = 0.36$) anche se in stretta vicinanza di un fondo caratterizzato da un profilo più piatto ("letto piano", fig. 21).

È interessante anche osservare come l'espressione utilizzata per il calcolo della lunghezza d'onda delle antidune, definita dalla equazione $L_b = 2\pi V^2/g$, dia luogo, se applicata alla velocità corrispondente al colmo di piena ($V = 3.37$ m s⁻¹), ad una lunghezza d'onda di 7.3 m. Tale valore interpreta correttamente i dati rilevati in campo rappresentativi della distanza media pool-pool delle sequenze N_1 , N_2 , N_4 , N_6

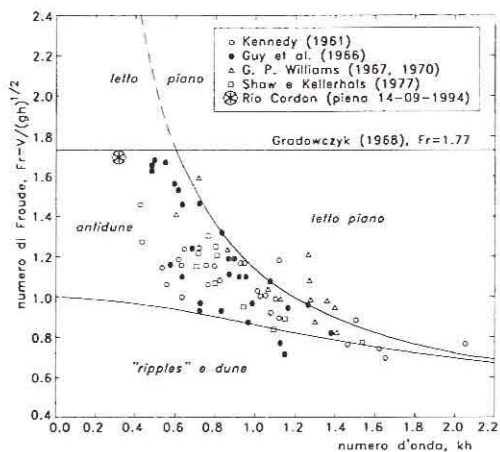


Fig. 21 - Dominio delle forme di fondo in funzione del numero d'onda e del numero di Froude della corrente (da Allen, 1982)

neofornate ($L_p = 6.8$ m), di quelle preesistenti e riarrangiate dopo la piena ($L_p = 7.3$ m), od anche di entrambe le tipologie ($L_p = 7.08$ m, tab. 10).

Nonostante queste obiettive concordanze permane tuttavia qualche elemento di incertezza sul modello di formazione delle gradinate supportato dalla teoria dell'antiduna. Essa richiede infatti che i sedimenti di grosse dimensioni rimangano completamente sommersi dai deflussi che condizionano la formazione della struttura. Questa situazione è stata raramente raggiunta nei tratti del Rio Cordon analizzati e solo in concomitanza di alcune sezioni trasversali piuttosto ristrette. Pertanto i nuovi tratti a gradinata sviluppatasi lungo il collettore possono essere spiegati con il modello dell'antiduna solo con qualche forzatura. Il modello potrebbe essere più aderente alle ipotesi formulate da diversi autori (ASHIDA *et al.*, 1984; GRANT, MITZUMAYA, 1991; GRANT, 1994; WHITTAKER, 1987) per portate di piena ancora più consistenti di quella misurata; in tal caso però si raggiungerebbe da un lato la sommergenza richiesta ma dall'altro si andrebbe a cadere nel campo del "letto piano" (fig. 21).

I parametri idraulici relativi al colmo di piena del Settembre 1994 possono anche riportarsi sul grafico di Grant (1994) relativo al dominio di formazione degli step e contenente anche i dati di laboratorio di Ashida *et al.* (1984). In questo grafico compare in ascissa il parametro adimensionale τ^* , dato dal rapporto fra lo sforzo tangenziale me-

dio (τ) e lo sforzo tangenziale (τ_{cmax}) necessario per mettere in movimento le particelle di maggiori dimensioni costituenti il letto, ed in ordinata il numero di Froude (Fr) della corrente. Nel grafico (fig. 22) vengono individuati punti (coppie τ^* , Fr) che non hanno dato luogo ad alcuno step, punti che hanno dato luogo a step ben definiti ed infine punti relativi a step non ben definiti. Come si può osservare nella figura 22, il campo di dominio degli step ottenuto da Grant appare molto più ristretto rispetto a quello di Ashida e tende ad escludere dal dominio di formazione degli step ben definiti i regimi di corrente nettamente supercritici ($Fr > 1$) ed i valori di $\tau^* > 1$. Ashida, diversamente da Grant, individua gli step ben definiti fino a $Fr \leq 1.7$ e $\tau^* \leq 1.2$. Non lontano dal limite superiore di Ashida ricade proprio il punto ottenuto per il Rio Cordon ($Fr = 1.7$, $\tau^* \cong 1$). Si può ammettere infatti, con buona approssimazione, che il parametro τ^* abbia assunto valori molto prossimi e di poco superiori all'unità, poiché presso il piazzale di deposito della stazione sono stati rinvenuti, al termine dell'evento di piena, solo alcuni massi della stessa dimensione del D_{100} del materiale superficiale d'alveo (fig. 12). La piena verificatasi sul Rio Cordon suffraga quindi, con un valore in campo, la possibilità di formazione di step pool in un regime supercritico.

Analizzando nella loro globalità le modificazioni degli step pool verificatesi sul Rio Cordon, queste sembrano generalmente rispondenti alle indicazioni fornite dalle prove di laboratorio di Rosport (1994) e di Rosport e Dittrich (1995). Si è potuto riscontrare che il meccanismo di trasformazione dominante è l'erosione al piede dello step con conseguente scalzamento da valle (fig. 23-a). L'azione erosiva prosegue progressivamente verso monte portando al collasso della struttura (fig. 23-b). Dopo il crollo i massi vanno a colmare il pool sottostante quindi, interratosi il pool ed essendosi ricostituito più a valle un allineamento di massi (fig. 23-c), la struttura a gradinata viene nuovamente a definirsi per effetto dell'azione erosiva e per la formazione di nuovi pool (configurazione indica-

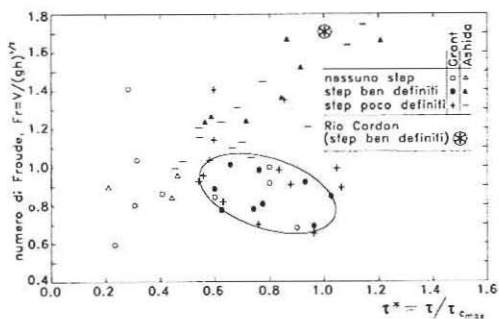


Fig. 22 - Dominio di formazione degli step pool (da Grant, 1994)

ta in fig. 23-a ma traslata più a valle).

Ammettendo quindi che gli step pool siano riconducibili a delle particolari antidune, queste potranno al più considerarsi delle antidune contraddistinte da una migrazione verso valle.

Una seconda modalità di trasformazione degli step rilevata sul Rio Cordon, verificatasi però meno frequentemente dello scalzamento, è la rottura parziale degli stessi per cedimento dei massi che collegano la gradinata alle sponde. In questo caso il fenomeno è ben identificabile sul campo: sulle sponde rimane una traccia evidente della nicchia di appoggio lasciata libera dal masso, mentre le "ali" dello step risultano traslate verso valle rispetto alla parte centrale dello step stesso. Una gradinata che ha subito un'erosione di entrambe le "ali" assume frequentemente una tipica conformazione planimetrica a V con vertice rivolto verso monte (fig. 24).

Nel Rio Cordon la migrazione verso valle delle gradinate è risultata particolarmente evidente ed uniforme nella sequenza SP₂ (fig. 14), mentre nei tratti SP₆, SP₇ ed SP₈ gli spostamenti a valle hanno riguardato solo alcuni step di ciascuna sequenza, dan-

do luogo a trasformazioni meno articolate ed omogenee e, complessivamente, più caotiche. Nei tratti SP₁, SP₃ ed SP₅ è prevalsa, invece, la disaggregazione parziale o totale delle gradinate con formazione di alcuni tratti a riffle associati ad accumuli disordinati oppure alla nuova costituzione di barre laterali. Attenendosi ai risultati delle prove di laboratorio (ASHIDA *et al.*, 1984, 1986; WHITTAKER, 1987) la suddetta trasformazione morfologica dovrebbe essere coadiuvata da una perdita di pendenza. Tale situazione trova riscontro nei dati rilevati dopo la piena del Settembre 1994, essendo i gradienti dei tratti suddetti (SP₁, SP₃, SP₅) inferiori o uguali a quelli rilevati in passato. Si può notare altresì, in particolare nella sequenza SP₅ (fig. 17), uno spianamento generalizzato di tutto il tratto, avvenuto in seguito all'allargamento della sezione ed al riempimento dei pool preesistenti per sedimentazione del materiale più fine trasportato dalla corrente. In questo caso la maggiore pendenza delle strutture a gradinata associata all'elevata scabrezza complessiva dell'alveo viene sostituita da una configurazione morfologica con profilo più piatto e con scabrezza dell'alveo più ridotta (anche se possono essere presenti step o riffle isolati e barre laterali). Il passaggio appena descritto, da un profilo a gradinata (fig. 23-a) ad un profilo di fondo più vicino ad un letto piano (fig. 23-d), è evidentemente da imputarsi ad una alimentazione solida da monte che prevale sul processo di erosione dei pool (fig. 23-b) ed induce una sorta di "sep-

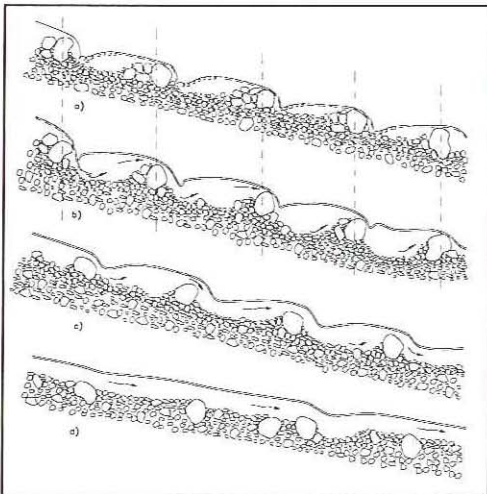


Fig. 23 - Schematizzazione del processo di rottura e trasformazione di una sequenza a step pool; le figure a-b-c illustrano la migrazione verso valle della struttura con mantenimento della unità a gradinata, le figure a-b-d illustrano il passaggio da una sequenza a step pool ad un tratto spianato con eventuali step o riffle isolati.



Fig. 24 - Rio Cordon: esempio di rottura di uno step per aggiramento ed erosione laterale.

pellimento” delle strutture trasversali. Fattore predisponente questo processo è anche l’allargamento dell’alveo che, riducendo la portata unitaria ed il carico cinetico della corrente, favorisce i processi deposizionali rispetto ai processi erosivi.

Le configurazioni a gradinata di nuova formazione hanno dato luogo, in tutti i tratti, ad una pendenza media della sequenza superiore a quella dei tratti misti di origine. La neoformazione delle quattro sequenze a step pool (N_1, N_2, N_4, N_6) è avvenuta a monte delle rispettive sequenze a gradinate SP_1, SP_2, SP_4, SP_6 ed ha occupato parte dei tratti che in precedenza erano stati classificati come tratti misti (M_2, M_3, M_5, M_7). Questi tratti, come si è detto precedentemente, sono caratterizzati da accumuli disordinati di materiale in cui le frazioni più grossolane formano dei gradini appena accennati e non ancora organizzati in allineamenti trasversali continui (fig. 25-a). I tratti misti, antecedentemente alla piena del Settembre 1994, rappresentavano, insieme agli step pool, una configurazione di equilibrio relativo del letto (non venivano cioè modificati da eventi di piena di tipo ordinario). Durante l’evento del 1994, una parte di alcuni tratti misti si è evoluta in tratti a step pool per un progressivo “intrappolamento” indotto dai massi più grossi sulle componenti di pezzatura immediatamente inferiore e, successivamente, sulle granulometrie più fini (fig. 25-b). I massi più grossi presenti nei tratti misti possono quindi considerarsi gli elementi cardine, statici o pseudo-statici, grazie ai quali si è formato un nuovo tratto a step pool (fig. 25-b,c).

Come già evidenziato in figura 19, le trasformazioni morfologiche avvenute nel Rio Cordon non hanno implicato la massimizzazione della resistenza al flusso. Anche i valori dei parametri geometrici medi delle sole quattro sequenze a gradinata neoformatesi si scostano visibilmente dal modello di Abrahams *et al.* (1995), essendo il rapporto H/L normalmente inferiore a S . La figura 26, rappresentativa del profilo longitudinale della sequenza N_1 neoformatesi, illustra chiaramente la prevalenza di gradini con pedata orizzontale od inclinata verso

valle rispetto a quelli con pedata in contropendenza. Tale configurazione, ancora in stato di definizione, è caratterizzata dall’abbondante presenza di materiale fine, intrappolato nei pool nella fase discendente della piena del 1994.

Il complesso meccanismo di formazione e di trasformazione parziale o totale delle strutture a gradinata delineato in questo lavoro implica che la teoria della massimizzazione della resistenza al flusso può essere interpretata solo come la possibile conseguenza finale di un processo di progressivo aggiustamento delle gradinate. Ad esso l’alveo sembra tendere, dopo il verificarsi dell’evento che ha dato origine a nuove sequenze a step pool, grazie al susseguirsi delle piene ordinarie che lo “ripuliscono” dai sedimenti mobilizzati e resi disponibili dall’evento di piena formativo.

Le osservazioni morfometriche e sedimentologiche condotte sul Rio Cordon prima e dopo la piena del Settembre 1994 costituiscono indubbiamente un utile con-

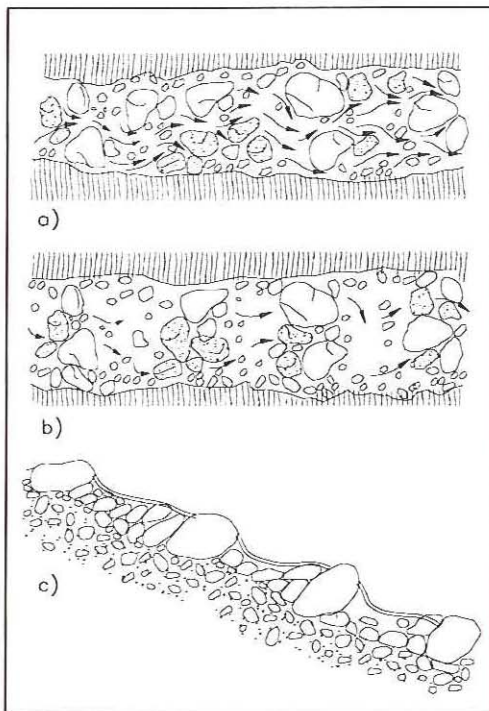


Fig. 25 - Schematizzazione del processo di trasformazione da un tratto misto (a) ad un tratto a gradinata (b-c).

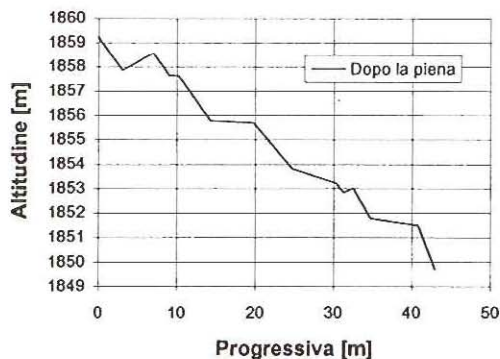


Fig. 26 - Profilo longitudinale della sequenza a gradinata N₁ di nuova formazione originatasi nel Rio Cordon a seguito della piena del Settembre 1994.

fronto su due differenti fasi evolutive delle sequenze a step pool. Ciò nonostante si ritiene che ulteriori approfondimenti debbano essere ancora condotti, affiancando queste osservazioni alla misurazione dei parametri idraulici (distribuzione di velocità in diverse sezioni, turbolenza del campo di moto) che si verificano in presenza di tale unità morfologica. Solo in questo modo, e coadiuvati anche da prove di laboratorio predisposte ad hoc, sarà possibile comprendere con un approccio sempre più quantitativo

BIBLIOGRAFIA

- ABRAHAMS A.D., LI G., ATKINSON J.F., 1994 - *Step-pool streams: an adjustment to maximum flow resistance (Abstract)*. *Hydraulic Engineering* 2, 815-816.
- ABRAHAMS A.D., LI G., ATKINSON J.F., 1995 - *Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance*. *Water Resources Research*, 31: 2593-2602.
- ALLEN J.R.L., 1982 - *Sedimentary structures*. Vol I, Elsevier, Amsterdam, 593 pp.
- ASHIDA K., EGASHIRA S., ANDO N., 1984 - *Generation and geometric features of steep-pool bed forms*, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 27 (B-2), 341-353.
- ASHIDA K., EGASHIRA S., NISHINO T., 1986 - *Structure and friction law of flow over a steep-pool bed form*, Bulletin of the Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, 29 (B-2), 391-403.
- ASHIDA K., TAKAHASHI T., SAWADA T., 1976 - *Sediment yield and transport in a mountainous small watershed*. Bull. DPRI, 26, 240, Disaster Prevention Research Institute, Kyoto University, Kyoto, Japan, 119-144.
- BILLI P., 1994 - *Morfologia dei corsi d'acqua*, Verde Ambiente, 5: 61-70.

l'origine delle strutture a gradinata e le condizioni che influenzano la loro stabilità.

Ringraziamenti

Si ringrazia il Centro Sperimentale Valanghe e Difesa Idrogeologica di Arabba (BL) nelle persone del Direttore dott. A. Luchetta e del dott. R. Scussel per il supporto logistico.

Un particolare ringraziamento è rivolto al Dott. Fabio Da Re per l'assistenza e collaborazione fornita nella realizzazione dei rilievi di campo ed all'Ing. Gianluca Giacometti per il supporto nelle fasi di editing del lavoro.

Le ricerche riguardanti il presente lavoro sono state promosse e finanziate dalla Unione Europea (DG XII, Environment and Climate Programme, Climatology and Natural Hazards Unit) nell'ambito del Progetto EROSLOPE II (Contratto ENV4-CT96-0347). Parte dell'attività di campagna è stata condotta con fondi MURST 60 e 40 %.

Vincenzo D'Agostino
Mario A. Lenzi

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali,
Agripolis, Università di Padova

- BILLI P., D'AGOSTINO V., LENZI M.A., MARCHI L., 1994 - *Geomorphological processes and sediment yield in a small basin of the Dolomites (north-eastern Italy)*. Proc. of the Int. Symp. on Forest Hydrology, Oct. 24-28, 1994, Tokyo, Japan, 487-496.
- BILLI P., D'AGOSTINO V., LENZI M.A., MARCHI L., 1995 - *Bed and Suspended Load Measurements, Slope and Channel Processes in a High Altitude Alpine Torrent*. Proceeding of the IV International Workshop on Gravel-Bed Rivers, Gold Bar, Oregon, in press.
- CHIN A., 1989 - *Step pools in stream channels*. *Progress in Physical Geography*, 13, 391-403.
- CHURCH M.A., JONES D., 1982 - *Channel bars in gravel-bed rivers*. In: Hey R.D., Bathurst J.C., Thorne C.R. (eds.). *Gravel-bed Rivers*. Wiley, Chichester, 291-324.
- CHURCH M.A., GILBERT R., 1975 - *Proglacial fluvial and lacustrine environments*. In: Jopling A.V., Mc Donald, *Glaciofluvial and glaciolacustrine sedimentation*. N. York Society of Economic Paleontologists and Mineralogists, 22-100.
- D'AGOSTINO V., 1994 - *Indagine sullo scavo a valle di opere trasversali mediante modello fisico a fondo mobile*. *L'Energia Elettrica*, 2: 37-51.
- D'AGOSTINO V., 1997 - *La rinaturalizzazione dei torrenti*

montani - Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, Università di Padova, 33, 7 pp.

D'AGOSTINO V., LENZI M.A., 1996 - *La valutazione del trasporto solido di fondo nel bacino attrezzato del Rio Cordon*. L'Acqua, 4: 23-40.

D'AGOSTINO V., LENZI M.A., MARCHI L., 1994 - *Sediment transport and water discharge during high flows in an instrumented watershed*. In: Ergenzinger P. and Schmidt K.H. (eds.), *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 52: 67-81.

DAVIS T.R., SUTHERLAND A.J., 1980 - *Resistance to flow past deformable boundaries*. Earth Surface Processes, 5: 175-179

DUKSON W., DUKSON L.J., 1995 - *Morphology of bedrock step-pool systems*. Water Resources Bulletin, 1: 43-51.

EGASHIRA S., ASHIDA K., 1989 - *Flow resistance and sediment transportation in streams with step-pool bed morphology*. Proceedings of the I.A.H.R. International Workshop on Fluvial Hydraulics of Mountain Regions, October 3-6, Trento, Italy, Part A: 31-44.

ERGENZINGER P., 1992 - *River bed adjustments in a step-pool system: Lainbach, Upper Bavaria*. In: Hey R.D., Billi P., Thorne C.R. (eds.), *Tacconi P. Dynamics of Gravel Bed Rivers*. Wiley, Chichester, 415-430.

FATTORELLI S., KELLER H.M., LENZI M.A., MARCHI L., 1988 - *An experimental station for the automatic recording of water and sediment discharge in a small alpine watershed*. Hydrol. Sciences Journal, 33: 607-617.

GRANT G.E., 1994 - *Hydraulics and sediment transport dynamics controlling step-pool formation in high gradient streams: a flume experiment*. In: Ergenzinger, P., Schmidt, K.H. (eds.), *Dynamics and Geomorphology of Mountain Rivers*. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer Verlag, Berlin-Heidelberg, 52: 241-250.

GRANT G.E., MIZUYAMA T., 1991 - *Origin of step-pool sequences in high gradient streams: a flume experiment*. In: Tominaga M. (ed.), *Proceedings of the Japan-U.S. Workshop on Snow Avalanche, Landslides, and Debris flow Prediction and Control*, Jpn. Sci. And Technol. Agency, Natl. Res. Inst. for Earth Sci. and Disaster Prev., Tsukuba, 523-532.

GRANT G.E., SWANSON F.J., WOLMAN M.G., 1990 - *Pattern and origin of stepped-bed morphology in high-gradient streams, Western Cascades, Oregon*. Geological Society of America Bulletin, 102: 340-352.

HAYWARD J.A., 1978 - *Hydrology and Stream Sediments in a Mountain Catchment*. Ph.D. thesis (vols. 1-3) University of Canterbury Christchurch, New Zealand.

HAYWARD J.A., 1980 - *Hydrology and Stream Sediment from Torlesse Stream Catchment*. Special Publication n. 17, Tussok Grasslands and Mountain Lands Institute, Lincoln College, Canterbury, New Zealand, 236 pp.

HEEDE B.H., 1972 - *Influences of a forest on the hydraulic geometry of two high mountain streams*. Water Resources Bulletin, 3: 523-530.

HEEDE B.H., 1981 - *Dynamics of selected mountain streams in the western United States of America*. Zetschrift fur Geomorphologie, 25: 17-32.

HUMBORG G., 1995 - *Typologische und morphologische untersuchungen an bergbächen im Buntsandsteinodendwald*. Mitt. Inst. f. Wasserbau u. Kulturtechnik, Univ. Karlsruhe, 192.

JUDD H.E., 1964 - *A study of bed characteristics in relation to flow in rough high-gradient natural channels*. Ph.D. thesis, Utah State University, Logan, Utah, 182 pp.

JUDD H.E., PETERSON D.F., 1969 - *Hydraulics of large bed element channels*. Utah Water Research Lab., Col-

lege of Engineering, Utah State University, Logan, Report PRWG 17-6, 115 pp.

KELLER E.A., MELHORN W.N., 1978 - *Rhythmic spacing and origin of pools and riffles*. Geological Society of America Bulletin, 82: 753-756.

KELLER E.A., SWANSON F.J., 1979 - *Effects of large organic material on channel form and alluvial processes*. Earth Surface Processes, 4: 361-380.

KELLER E.A., TALLY T., 1979 - *Effects of large organic debris on channel form and fluvial processes in the Coastal Redwood Environment*. In: *Adjustment of the fluvial system; Tenth Annual Geomorphology Symposia Series*, Binghamton, New York; Rhodes D., Williams G. (Editor), Kendall/Hunt Publishing Co., 169-197.

KENNEDY J.F. 1963 - *The mechanics of dunes and antidunes in erodible-bed channels*. Journal of Fluid Mechanics, 16: 521-544.

LENZI M. A., 1992 - *Campionamento ed analisi di materiale d'alveo con componenti grossolane*. In: *Il bacino attrezzato del Rio Cordon*, Quaderni di Ricerca, Regione Veneto, Marchi L. (ed.), 13: 159-178.

LENZI M. A., MARCHI L., 1988 - *Assessment of bed material composition in a small alpine stream*. In: *Riunione annuale dell'Unità del Progetto nazionale di ricerca M.P.I. 40 %, Fenomeni di Trasporto Solido, Unità di Trento*, 113-122.

LENZI M. A., BILLI P., D'AGOSTINO V., 1997 - *Effects of an extremely large flood on the bed of a steep mountain stream*. Proc. of the conference on Management of Landscapes Disturbed by Channel Incision: Stabilization, Rehabilitation, Restoration; Wang Langendoen, Shields (eds.), Oxford, Mississippi, USA, May 19-22: 1061-1066.

LENZI M.A., MARCHI L., SCUSSEL G.R., 1990 - *Measurement of coarse sediment transport in a small alpine stream*. In: Lang H. and Musy A. (eds.), *Hydrology in Mountainous Regions, I Hydrological Measurements, the Water Cycle*, IAHS Publ., 193: 283-290.

LEOPOLD L. B., WOLMAN M. G., 1957 - *River channel patterns: braided, meandering and straight*. US Geol. Survey, Prof. Paper 282-B.

LEOPOLD L. B., WOLMAN M. G., MILLER J. P., 1964 - *Fluvial processes in geomorphology*. Freeman, San Francisco, California, 522 pp.

MILNE J. A., 1982 - *Bed-material size and the riffle-pool sequence*. Sedimentology, 29: 267-278.

O'LOUGHLIN C.L., 1969 - *Streambed investigations in a small mountain catcment*. New Zealand Journal of Geology and Geophysics, 86.

PETERSON D.F., MOHANTY P.K., 1960 - *Flume studies of flow in step, rough channels*. Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, J. Hydraulic Div., 86: 55-76.

RICHARDS K. S., 1976 - *The morphology of riffle-pool sequences*, Earth Surface Processes, 1: 71-88.

RICHARDS K. S., 1978a - *Simulation of flow geometry in a riffle-pool stream*, Earth Surface Processes, 3: 345-354.

RICHARDS K. S., 1978b - *Channel geometry in the riffle-pool sequence*, Geographiska Ann., 60A, 23-27.

ROSGEN D.L., 1994 - *A classification of natural rivers*. Lectures Notes in Elsevier Sciences, B.V., Catena, 22: 169-199.

ROSPORT M., 1994 - *Stability of torrent beds characterised by step pool texture*. Journal of Sed. Res., 3:124-132.

ROSPORT M., DITTRICH A., 1995 - *Step Pool Formation ad Stability - a Flume Study*. Proc. 6th International Symposium on River Sedimentation, Nov. 1995, New Delhi,

India, 525-532.

SCHÄLCHLI U., 1991 - *Morphologie und Stromungsverhältnisse in Gebirgsbächen; Ein Verfahren zur Festlegung von Restwasserabflüssen*. Mitt. der Vers. Anst. f. Wasserb. Hydrol. u. Glaziol.; Nr. 113; ETH Zürich.

SHAW J., KELLERHALS R., 1977 - *Paleohydraulic interpretation of antidune bedforms with applications to antidunes in gravel*, Journal of Sedimentary Petrology, 47: 257-266.

WHITTAKER J.G., 1982 - *Flow and sediment movement in steeped channels*. Ph.D. thesis, Lincoln College, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand.

WHITTAKER J.G., 1985 - *Local scour at steps in mountain*

ivers in floods. In: 2nd Intl. Con. on Floods and Flood Control, Cambridge, UK, 353-363.

WHITTAKER J.G., 1987 - *Sediment transport in step-pool streams*. In: Thorne, C.R., Bathurst, J.C., Hey, R.D. *Sediment transport in Gravel-Bed Rivers*, Wiley, Chichester, 545-579.

WHITTAKER J.G., JAEGGI M.N.R., 1982 - *Origin of step-pool systems in mountain streams*. ASCE, Journal of Hydraulic Division, 108: 758-773.

WOJN. E.E., GRODEK T., 1994 - *Channel bed-steps along Nahal Yael, Negev desert, Israel*. Geomorphology, 9: 117-126.

YANG C. T., 1971 - *Formation of Riffle and Pool*. Water Resources Research, 6: 1567-1574.

SOMMARIO

I torrenti alpini si trovano generalmente a competere con un eccesso energetico al quale rispondono attraverso repentini cambiamenti plano-altimetrici. Tali modificazioni avvengono usualmente durante eventi idrologici estremi e sia il trasporto dei sedimenti che la stabilità morfologica dell'alveo possono essere considerati come componenti di un complesso sistema nel quale molti e diversificati processi vengono attivati. Nella memoria vengono analizzati l'origine, le condizioni di formazione e la dinamica di sviluppo delle morfologie a gradinata, denominate anche "step pool". Il torrente studiato, il Rio Cordon, è un tipico corso d'acqua montano caratterizzato da una pendenza del letto sempre superiore al 10% e da versanti molto acclivi. La struttura morfologica e sedimentologica del torrente è in gran parte controllata dall'elevata pendenza e dal materiale d'alveo molto grossolano presente nei diversi tratti. Le caratteristiche sequenze a gradinata (step) si alternano ad altri tratti a riffle-pool e a barre laterali. Una piena di elevato tempo di ritorno (30-50 anni) verificatasi nel Settembre 1994 ha provocato consistenti modificazioni morfologiche dell'alveo del torrente. Nella memoria vengono presentati e confrontati i parametri morfologici e granulometrici delle diverse sequenze misurati prima e dopo la piena. Alcune sequenze a gradinata hanno evidenziato una tendenza alla migrazione verso valle, altre quattro nuove sequenze si sono formate a monte delle unità già preesistenti, mentre in altri tratti è prevalsa la disaggregazione parziale o totale delle gradinate con formazione di riffle-pool e di barre laterali. La distanza media intercorrente tra gli step (L) è aumentata di quasi due metri mentre l'altezza media dei gradini (H) è rimasta inalterata. Vengono inoltre discusse alcune teorie ricavate da prove di laboratorio, in particolare l'analogia tra lunghezza d'onda delle antidune e la distanza fra gli step ed il modello che considera le strutture a gradinata come una configurazione di massimizzazione della resistenza al flusso. Dalle osservazioni in campo svolte sul torrente Cordon si è potuto riscontrare che il meccanismo di trasformazione predominante è quello della migrazione verso valle delle strutture e che la distruzione dei gradini avviene prevalentemente per erosione al piede con conseguente scalzamento da valle.

SUMMARY

As energy excess is generally available to mountain torrents, they respond to changes quickly and adjust their stream bed to the new conditions. In the Alps stream adjustment commonly occurs during large hydrological events and both, channel morphology stability and sediment transport can be regarded as components of a complex system in which several processes are active. In the present research the origin, formation and dynamics of step-pool beds were investigated. The study stream, the Rio Cordon, is a typical, short, high gradient (over 0.10) stream characterized by almost vertical cliffs in the headwater (over 2000 m a.s.l.) and steep slopes. The morphological structure and the sedimentology of the stream bed are closely related to its gradient and to both quantity and size of the particle supplied. Riffle-pool and lateral bar reaches alternate with the more typical steep-pool reaches. In September 1994 a large flood (Q_{30-50} , the largest ever measured since the construction of the gauging facility) widely affected the stream bed. A comparison of channel morphology and bed material data measured before and after such an extreme flood is presented. A few of the former step-pool reaches showed particles downstream displacement, other were turned into riffle-pool and bar reaches, while four new sequences were formed. The step length (L) of those reaches that survived the flood increased and the step high (H) did not change too much. The analogy of step spacing with antidune wavelength and the model suggests that step pools evolve toward a condition of maximum flow resistance are also discussed. Results from field observations on the dynamics of the step-pool sequences showed a tendency to the downstream migration and proved that the destruction normally starts downstream of a step structure, by scouring the large elements. Results deriving from the Rio Cordon measurements have pointed out the important role played by field investigations in attempting to understand natural processes which are relevant to a delicate ecosystem such as an alpine torrent.