Internationales Symposion
INTERPRAEVENT 2004 – RIVA / TRIENT

UNA REVISIONE CRITICA DEL CONCETTO DI PENDENZA DI CORREZIONE DI UN TORRENTE

A CRITICAL REVISION OF THE CORRECTION BED SLOPE OF A STEEP STREAM

Vincenzo D'Agostino[1], Mario Cerato[2]

RIASSUNTO

La stima della pendenza di correzione di un corso d'acqua è un problema centrale nell'ambito della progettazione di un intervento di stabilizzazione del letto e delle sponde. Tuttavia, a dispetto della sua importanza e delle ricadute che la sua scelta comporta sulla dimensione complessiva degli interventi di sistemazione idraulica, non è ancora del tutto consolidato, soprattutto in ambito montano, un approccio metodologico che coniughi le basi deterministiche e concettuali con le scelte progettuali che, di fatto, vengono adottate in sede esecutiva. La memoria propone un riesame critico di alcuni interventi di consolidamento realizzati in Provincia di Trento. L'analisi è stata condotta mediante una verifica a posteriori sull'efficienza funzionale delle opere e ha messo in evidenza come la scelta di un criterio per l'assegnazione della pendenza di correzione sia anche collegato alla specificità della problematica sistematoria in esame. Uno dei fattori che si rivela decisivo per la stima della pendenza di correzione è inoltre rappresentata dal tipo di trasporto solido che alimenta il tratto da sistemare.

Key words: Pendenza di correzione, briglie, controllo dell'erosione

ABSTRACT

The equilibrium bed slope assessment is a central problem in the bed and banks stabilization of a river. Despite to its importance and to the followings costs of the works, there is not a complete agreement - mainly in the mountain environment - between the theoretical and deterministic methodologies and the effective design choices. The paper is focused on the analysis and on the critical revision of some stabilisation works constructed since several years in the Province of Trento. The degree of efficiency is the main factor for comparing the different situations. Results proves a decisive variable in the correction slope assessment consists in the rate of the supplying sediment transport.

Key words: Equilibrium bed slope, check-dams, torrent control

1 Professore Associato, Università di Padova – Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali, Viale dell'Università, 16, 35020 Legnaro (PD), Italia (Tel.: +390498272682, e-mail: vincenzo.dagostino@unipd.it) (lavoro realizzato con fondi PRIN-SINBA, anno 2001 e ex 60%, anno 2003)

2 Dirigente del Servizio, Provincia Autonoma di Trento, Servizio Sistemazione Montana, Via G.B. Trener 3, 38100 Trento, Italia

INTRODUZIONE

La valutazione della pendenza di compensazione da assegnare ad un torrente è una delle tematiche più indagate nell'ambito della progettazione degli interventi di sistemazione idraulica di un corso d'acqua collinare o montano. Si tratta, in sintesi, di definire quella pendenza secondo la quale correggere il profilo originario del corso d'acqua in un tratto che manifesta un'eccessiva erosione ed approfondimento del fondo. L'inserimento lungo il profilo di opere trasversali di assegnata altezza ed interdistanza permette di conseguire una pendenza più ridotta, che dovrebbe tendere, nel medio-lungo periodo, alla pendenza di correzione prevista in sede di progetto. La previsione della pendenza di correzione, detta anche di equilibrio, dovrebbe essere tale da non portare a sovradimensionare l'intervento di consolidamento e, dall'altra parte, da non rendere necessario un successivo intervento, qualora, dopo una prima sistemazione, si manifestino ancora, tra un'opera e la successiva, fenomeni erosivi pronunciati. Le conseguenze di una riduzione troppo spinta della pendenza originaria non sono rappresentate unicamente da un onere eccessivo delle opere di correzione, ma anche da un'azione di limitazione troppo accentuata del trasporto dei sedimenti. In quest'ultimo caso si rischia, infatti, di sanare localmente il problema della stabilità dell'alveo, ma di trasferire a valle del tratto sistemato il problema erosivo, a causa di una riduzione troppo drastica dei sedimenti che lo alimentano.

Ulteriori varianti al concetto di pendenza di correzione sono state anche introdotte più recentemente dalla adozione di interventi di ricostruzione fluviomorfologica del torrente (D'Agostino et. al., 1997; Cerato, 1999) ed hanno portato a realizzare una correzione del fondo che, emulando le morfologie naturali a step e pool, presenta solitamente un profilo in contropendenza fra il piede di un'opera e il coronamento della successiva.

I metodi per la stima della pendenza di correzione (i_c) si possono suddividere in tre grandi gruppi: vi sono i metodi che muovono da un approccio deterministico, quelli a base sostanzialmente empirica e quelli, infine, che propongono un approccio di tipo comparativo.
Gli approcci deterministici mirano a conseguire le condizioni di stabilità o quantomeno di incipiente movimento, per i sedimenti che compongono il letto. Questi metodi, pur basandosi sullo stesso principio, si differenziano anche fortemente fra di loro, in quanto divergono sia per la scelta del frattile (d_{xx}) della curva granulometrica dei sedimenti del letto per i quali si impone la stabilità limite, sia per la frequenza probabile della portata di piena per la quale si vuole che il diametro di riferimento risulti stabile. Si ricorda, ad esempio, che nelle Alpi Italiane e nell'Appennino Centrale si fa frequentemente riferimento ai diametri più grossolani (d_{84}, d_{90}) e ad una portata di piena con tempo di ritorno di 10-20 anni (Benini, 2000). Per le fiumare Calabre e per i torrenti della Sicilia le relazioni di stima di i_c considerano spesso i frattili mediani (d_{50}) o quelli più grossolani (d_{84}) e focalizzano l'attenzione su di una portata di riferimento con tempo di ritorno di 2 anni, quindi prossima alla portata di modellamento (o di piene rive) del corso d'acqua (Ferro, 2002). Le relazioni di tipo deterministico hanno inoltre registrato, in questi ultimi anni, degli ulteriori affinamenti, che tengono conto dell'effetto stabilizzante indotto dalla presenza in superficie di sedimenti più grossolani e di un complessivo fenomeno di pavimentazione del letto. Ferro et al. (1996) hanno identificato nel d_{90} il diametro da utilizzare più efficacemente per il calcolo di i_c. Gli Autori, per alcuni torrenti toscani, siciliani e calabri, hanno anche introdotto un fattore di proporzionalità con cui amplificare il d_{90} e mediante il quale esprimere un diametro fittizio (denominato "scabrezza di controllo") che tiene conto del complesso dei fenomeni di interazione del flusso con l'intera composizione granulometrica dei sedimenti. Per avere un'idea dell'influenza dei

processi di pavimentazione, é interessante osservare come, per eventi di piena con tempi di ritorno di due anni, questo fattore di proporzionalità sia risultato compreso fra 1 e 3.

I metodi di tipo empirico per la stima di i_c sono basati sulla prevalente interpretazione di osservazioni di campo e si riconducono essenzialmente a quelle ricerche basate sulla teoria del regime dei corsi d'acqua oppure alla osservazione di tratti sistemati che hanno assunto, verosimilmente, una pendenza di equilibrio. Le relazioni basate sulla teoria del regime si riferiscono a canali di tipo alluvionale, non interessati da sistemazioni idrauliche, nei quali i_c viene considerata come una pendenza di equilibrio del corso d'acqua in ragione della forma stessa assunta dalla sezione trasversale, della granulometria dei sedimenti e del regime delle portate solide e liquide. Quest'approccio è da ritenersi non del tutto affidabile (Santoro e Ferro, 1993), poiché non tiene conto dell'effetto di corazzamento del letto e della riduzione del trasporto solido che vengono indotti dalla presenza delle opere di consolidamento.
Più attendibili, specie in un'ottica progettuale, sono invece quelle valutazioni empiriche di i_c (Valentini, 1912; Woolhiser e Lenz, 1965; Calamini et al., 1978; Della Lucia et al.,1980) che, utilizzando delle tecniche di regressione multipla, propongono delle equazioni che legano la pendenza i_c alle variabili che influenzano la compensazione del profilo, quali ad esempio la larghezza della gaveta della briglia, l'altezza dell'opera, la pendenza originaria del fondo, il raggio idraulico della sezione, alcuni diametri caratteristici dei sedimenti. Il limite di queste relazioni è da attribuirsi alla cautela con la quale esse possono estendersi al di fuori dal contesto geografico nel quale sono state ottenute.

L'approccio di tipo comparativo per la stima di i_c consiste essenzialmente nell'individuare nel corso d'acqua nel quale si interviene dei tratti d'alveo che si possano considerare come un "modello" di riferimento di un assetto stabile del profilo. Una volta individuate queste situazioni, la pendenza i_c per il tratto in progetto è desunta da esse tenendo conto della diversa entità dei deflussi che caratterizzano la situazione da sistemare. Nel noto criterio del confronto di Thiery (1914) entrano in gioco, ad esempio, oltre alla pendenza originaria del tratto di riferimento, anche i rapporti fra portate liquide e larghezze dell'alveo delle due situazioni a confronto. Un altro metodo di confronto può essere considerato anche quello proposto da Pica e Preti (1999). Questo metodo si fonda sull'ipotesi che, lungo il collettore principale del corso d'acqua, il prodotto della pendenza locale del tratto (i) per la radice quadrata dell'area drenata sottesa (A) si possa ritenere costante. L'osservazione di tutti i tratti stabili in un certo torrente oggetto di intervento consente quindi di calcolare un valore medio di $i\,A^{0.5}$ mediante il quale desumere il valore di i_c nel tratto di interesse. Un criterio non dissimile è stato presentato anche da Watson e Biedenharn (1999), che propongono di ottenere delle leggi regionali di stabilità del corso d'acqua del tipo: $i=k\,A^{-n}$, ove k ed n sono costanti da desumersi sulle situazioni monitorate; il parametro n in questo caso non deve essere necessariamente pari a 0.5 come invece è stato proposto da Pica e Preti (1999).

All'estesa attività di ricerca per la stima di i_c spesso non corrisponde una pari attenzione nella sua scelta in ambito progettuale. Inoltre, non esiste ancora una soddisfacente sinergia fra i metodi teorici di stima e le modalità di progettazione che vengono adottate. L'osservazione delle sistemazioni eseguite in passato ha inoltre evidenziato che l'equilibrio del profilo di fondo di un torrente risulta dipendere in misura considerevole dalle specifiche condizioni che contraddistinguono ciascun bacino, specie per quel che riguarda il regime di alimentazione solida e l'avvicendarsi nel tempo di piene di diversa entità. La bilancia di Lane (1955) fornisce una buona giustificazione a questa evidenza. Se si indica con Q la portata liquida, G_s l'alimentazione solida che caratterizza un certo tratto del torrente, d_{50} la granulometria

mediana del materiale del letto ed α una costante di proporzionalità, la relazione di Lane può scriversi nella forma:

$$i_c = \alpha \frac{G_s \, d_{50}}{Q} \tag{1}$$

L'eq.(1) indica che, oltre al deflusso e alle dimensioni granulometriche dei sedimenti, vi è un terzo parametro, rappresentato dall'alimentazione solida (G_s), che influenza direttamente i_c.

Nella memoria sono presentate tre differenti soluzioni sistematorie realizzate dal Servizio di Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento. L'obiettivo è quello di evidenziare le difficoltà in cui si incorre operando una valutazione solo analitica della pendenza di correzione e di sottolineare la necessità di tenere conto delle variabili che regolano, nel medio-lungo periodo, l'equilibrio del corso d'acqua (eq.1).

I CASI DI STUDIO E LE MISURE EFFETTUATE

I casi analizzati sono relativi a tre bacini montani, Val Calcara, Fersina e Vanoi, localizzati nella parte sud orientale della Provincia di Trento. I tre bacini appartengono tutti alla parte montana del bacino del fiume Brenta e sono localizzati nel settore sud orientale della Provincia di Trento (Italia). La piovosità media annua dell'area è compresa tra i 1300 e i 1400 mm. Per il torrente Fersina e Vanoi i fenomeni di piena più significativi avvengono, per lo più, nel periodo autunnale e tardo primaverile. Per il torrente Val Calcara, che sottende un bacino di dimensioni un po' più contenute, si verificano fenomeni di piena molto significativi anche a seguito di temporali estivi di forte intensità e breve durata.

Si riassumono in tabella 1 le principali caratteristiche morfometriche dei tre bacini. I valori riportati per il Val Calcara si riferiscono al bacino chiuso alla confluenza con il fiume Brenta. I valori di tabella 1 relativi ai bacini del Fersina e del Vanoi si riferiscono invece ai bacini chiusi in corrispondenza dell'intervento di sistemazione che è stato analizzato.
Nella stessa tabella si riportano anche i valori del tempo di corrivazione del bacino (t_c, ore), calcolati secondo l'espressione proposta da Ferro (2002):

$$t_c = 0.675 \sqrt{A} \tag{2}$$

essendo A la superficie del bacino espressa in km^2.

Tab. 1: Principali caratteristiche morfometriche dei bacini oggetto di studio
Tab. 1: Main morphometric characteristics of the basins

	Superficie A (km^2)	Lunghezza asta principale allo spartiacque L (m)	Pendenza media asta principale i (m/m)	Pendenza media bacino I_b (m/m)	Tempo di corrivazione t_c (ore)
Fersina (a Pompermaier)	21.52	5760	0.153	0.51	3
Vanoi (a Canal S. Bovo)	82.22	12950	0.076	0.53	6
Val Calcara	1.43	2400	0.396	0.69	0.8

Si descrivono di seguito le principali caratteristiche di ciascuna delle singole soluzioni sistematorie che sono state realizzate nei tre corsi d'acqua.

Torrente Fersina. La Valle del Fersina (o Val dei Mocheni) è una valle che, iniziando orograficamente dalla cittadina di Pergine, si insinua nella parte occidentale della catena del Lagorai. Si tratta di una vallata con particolari caratteristiche paesaggistiche ed etniche, essendo abitata da una popolazione con origini tedesche, derivante da un insediamento medioevale di minatori provenienti da paesi al nord delle Alpi. La valle ha un'urbanizzazione di tipo tedesco, a masi sparsi e piccoli agglomerati urbani sui versanti; il fondovalle è quindi pressoché disabitato ed è percorso dal torrente Fersina. Nel fondovalle le sistemazioni idrauliche sono limitate a qualche piccolo consolidamento ed alla presenza di alcune briglie di trattenuta, finalizzate al controllo del trasporto solido. Il torrente Fersina è un corso d'acqua molto importante, perché il suo tratto terminale, prima dell'immissione nel fiume Adige, attraversa la città di Trento alla quale, in passato, ha causato danni piuttosto ingenti. A seguito di questi eventi e della crescente urbanizzazione di Trento il Fersina ha subito diversi spostamenti del suo corso terminale.
Si è analizzato un tratto di torrente sistemato mediante briglie in massi (Fig. 1 e 2) negli anni 1991 e 1992. Gli obiettivi della sistemazione erano:
- mettere in sicurezza la centrale idroelettrica del Comune di Palù del Fersina;
- consolidare il corso d'acqua sistemando un profilo del fondo che presentava un'evidente anomalia per la presenza dell'opera di presa di un'altra centrale idroelettrica;
- definire e consolidare una sezione dell'alveo per evitare sbandamenti della corrente e l'erosione del piede dei versanti.

In considerazione del valore paesaggistico ed ambientale del fondovalle, si sono adottati criteri di intervento miranti a minimizzare l'impatto ambientale e a conseguire una sistemazione che, pur nel rispetto delle condizioni di sicurezza idraulica, richiedesse nel tempo modesti interventi di manutenzione. Il bacino sotteso dal tratto sistemato ha una superficie (21.5 km^2), pari a circa il 28% della superficie totale del bacino chiuso poco a monte di Pergine. La larghezza (B) del letto varia fra i 7 e i 15 m e, nel tratto sistemato, presenta un valore medio intorno ai 12 m. Dal punto di vista geologico, nel bacino vi è una prevalenza di rocce porfiriche con presenza di ammassi detritici morenici. Lungo l'alveo sono molto abbondanti massi delle dimensioni di 1-1.5 m, aventi una forma tipicamente rotondeggiante.

Le caratteristiche della sistemazione idraulica possono così riassumersi:
- riapertura di una sezione di deflusso adeguata mediante svaso dei detriti alluvionali del fondovalle;
- consolidamento dell'alveo con opere in massi, vincolate con funi di acciaio ad una retrostante struttura in calcestruzzo armato; paramento di valle conformato come uno scivolo a forte inclinazione;
- realizzazione di difese spondali con scogliere in massi a secco;
- pendenza di compensazione nulla, ad eccezione di un paio di tratti con una pendenza dell'1%;
- sistemazione ambientale dell'alveo mediante il posizionamento fra un'opera e l'altra di sedimenti di granulometria elevata e prevedendo l'inserimento di talee di salice nelle scogliere spondali.

Il profilo del talweg sistemato presenta delle interdistanze fra le opere e delle altezze non costanti. Le interdistanze variano fra gli 11 e i 18 m nel tratto a monte della soglia di derivazione ad uso idroelettrico (Fig. 3a) e arrivano anche fino a circa 40 m nel tratto a valle della derivazione (Fig. 3b). Questa caratteristica si rivela, peraltro, una connotazione positiva dal punto di vista paesaggistico, poiché rende molto più vario l'intero complesso sistematorio.

Si alternano così briglie-step di notevole altezza (Fig. 1) con riffle-step di consolidamento (Fig. 2) od aventi talora anche la funzione di controbriglia. Il tratto sistemato risulta, dopo oltre dieci anni dall'intervento, in condizioni di buona stabilità; la vegetazione lungo le sponde è ben affermata (Fig. 1 e 2). Fra gli eventi di piena verificatisi dopo il 1992 si ricorda quello a carattere eccezionale del Novembre 2000, che è risultato non molto discosto, per le sue caratteristiche pluviometriche, da quello storico dell'anno 1882 (Provincia Autonoma di Trento, 2001). Gli eventi di piena verificatisi hanno anche il merito di aver ben modellato le pool e di aver meglio ridistribuito i massi introdotti artificialmente all'epoca dell'intervento. Una caratteristica di notevole interesse è la comparsa, specie nei tratti che presentano una maggiore interdistanza tra le opere (Fig. 3b), di step secondari abbastanza ben delineati dal punto di vista morfologico. In alternativa a questi step si sono anche formati, in alcuni punti, delle vere e proprie barre centrali sulle quali si è insediata stabilmente la vegetazione.

Fig. 1: Briglia-step in massi realizzata sul torrente Fersina
Fig. 1: Boulder-step check-dam constructed in the Fersina torrent

Fig. 2: Briglia a riffle-step in massi realizzata sul torrente Fersina
Fig. 2: Riffle-step check-dam constructed in the Fersina torrent

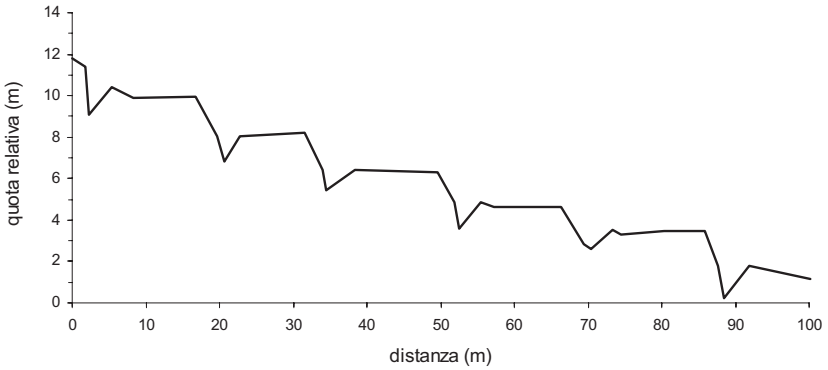

Fig. 3a: Torrente Fersina: profilo del fondo a monte della soglia di derivazione
Fig. 3a: Fersina torrent: bed profile upstream of the bed sill for water diversion

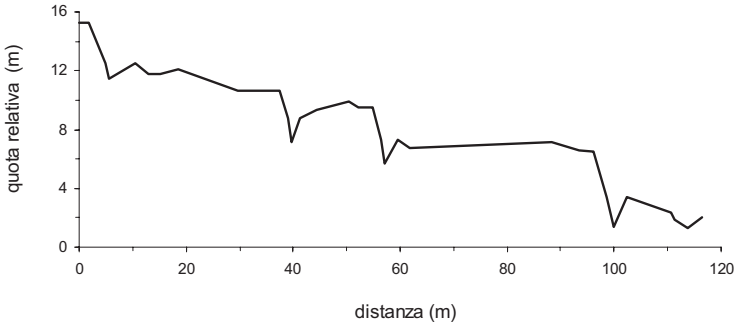

Fig. 3b: Torrente Fersina : profilo del fondo a valle della soglia di derivazione
Fig. 3b: Fersina torrent: bed profile downstream of the bed sill for water diversion

Val Calcara. Si tratta di un ripido bacino calcareo situato sul versante destro della Valsugana (Comune di Roncegno). Le caratteristiche principali di questo bacino sono:
- la testata costituita da rocce calcaree subverticali molto fratturate per la presenza della grande dislocazione tettonica detta appunto "della Valsugana";
- vaste aree di detriti di falda posizionati su pendenze notevoli sia fra le rocce, sia alla base della zona rocciosa;
- un ampio conoide formato da un ammasso detritico-alluvionale ed urbanizzato solo parzialmente nella parte inferiore.

Il corso d'acqua è assolutamente effimero e i deflussi si generano solo in occasione di piogge molto prolungate o molto intense; queste ultime possono dare origine a colate detritiche, come avvenuto nel luglio 1994 quando una colata detritica, che ha mobilizzato all'incirca 10000 m^3 di materiale, ha raggiunto l'alveo del fiume Brenta ed ha provocato danni anche alla ferrovia Trento-Venezia. La colata ha determinato il dilavamento di tutti i collettori della parte alta del Vallon della Calcara e una forte erosione del tratto terminale che scorre in conoide e che, all'epoca dell'evento, era privo di sistemazioni. Dopo questo evento alluvionale è stata intrapresa una manutenzione straordinaria della sistemazione esistente. Questa sistemazione (risalente al 1930) era localizzata a monte del tratto eroso ed era costituita da briglie di consolidamento in sassi semilavorati e malta, terrapieni deviatori rivestiti in pietrame. Vi era inoltre, prima del canale di confluenza nel Brenta, un bacino di deposito sotteso da un'opera di trattenuta chiusa.

Il lavoro di manutenzione e integrazione delle opere esistenti è consistito:
- nella trasformazione della briglia di chiusura del bacino in briglia aperta al fine di favorire lo smaltimento in Brenta del materiale sottile trasportato dalle piene ordinarie;
- nello svaso del bacino di trattenuta che risultava intasato prevalentemente da materiale limoso accumulato nel tempo dagli eventi ordinari;
- nel rinforzo delle opere esistenti e dall'integrazione con altre opere costruite in massi vincolati ad una struttura in calcestruzzo armato.

Il lavoro è stato completato con il consolidamento di un tratto d'alveo lungo circa 400 m e che termina poco a monte del bacino di deposito. Su questo tratto d'alveo che in passato non era stato sistemato, la scelta progettuale è stata quella di intervenire con briglie di consolidamento in calcestruzzo armato e gaveta rivestita in pietrame (Fig. 4). Le briglie sono state posizionate in modo tale da dare alla pendenza di compensazione un valore di appena il 70-80% della pendenza dell'alveo originario. Questa scelta è stata suggerita dalla convinzione che le frequenti ed abbondanti portate solide provenienti da monte determinassero lo

scalzamento delle opere. In ogni caso, se questa previsione non fosse stata centrata, la facile accessibilità della zona non avrebbe comportato oneri eccessivi per un intervento supplementare mediante il quale inserire, a metà dell'interdistanza fra una briglia e la successiva, un'opera della stesse caratteristiche dimensionali.
Allo stato attuale le briglie non presentano alcun problema di scalzamento e il tratto d'alveo fra opera ed opera si è andato strutturando e consolidando naturalmente. Come già verificatosi in altre situazioni analoghe, il passaggio di eventuali colate detritiche non dovrebbe alterare in modo significativo questo assetto sufficientemente stabilizzato, ma eventualmente creare un ulteriore strato di sedimenti movimentabile da eventi di piena accompagnati da semplice trasporto di fondo.

Torrente Vanoi. Dal punto di vista geologico il bacino è caratterizzato, nel complesso, da rocce fortemente impermeabili (porfidi, graniti, filladi), alle quali si accompagnano vasti depositi detritici debolmente stabili. Il tratto d'alveo del torrente Vanoi è stato gravemente alterato dalla disastrosa alluvione del 1966 che ha anche causato la distruzione del ponte di collegamento fra Canal S. Bovo e il passo Broccon. La ricostruzione del collegamento mediante un viadotto e ragioni di sicurezza inerenti l'instabile versante destro su cui sono situati gli abitati del paese di Ronco hanno determinato la necessità di un intervento di stabilizzazione di un tratto d'alveo fra la località Lago (a monte) e la confluenza con il torrente Lozen.

La sistemazione del torrente Vanoi è stata eseguita a partire dal 1970 mediante grandi briglie in cemento armato con struttura a mensola dell'altezza di circa 7 m, spaziate di circa 100-150 m e con una larghezza in gaveta compresa tra i 55 e i 60 m (Fig. 5). La pendenza di compensazione di questa sistemazione è stata oggetto di parecchie discussioni fra lo staff tecnico dell'allora Azienda Speciale di Sistemazione Montana, poiché, considerando le notevoli dimensioni trasversali delle opere, influenzava in modo determinante il costo complessivo della sistemazione. Alla fine si è optato per un valore della pendenza ritenuto oltremodo cautelativo ed avente un valore intorno al 2%. Ciononostante, già intorno al 1984-1985, è risultato evidente che l'alveo andava stabilizzandosi su pendenze ancora inferiori e quindi le opere risultavano scalzate per la parte corrispondente alla larghezza della gaveta. Lo scalzamento non comportava dei gravi problemi statici per vari fattori, fra cui la monoliticità delle opere, la notevole larghezza della fondazione (circa 7 m) ed il suo spessore. Dal 1990 è comunque iniziata una sistematica opera di completamento di questa sistemazione mediante la costruzione di controbriglie. Iniziando dalle situazioni di scalzamento più evidenti sono state realizzate controbriglie in massi vincolati con funi di acciaio ad una struttura in cemento armato. Questa tipologia è stata scelta:
- per motivi economico-funzionali legati alla possibilità di realizzare l'opera in tempi brevi nel periodo primaverile prima del disgelo, unico periodo utile per evitare sicuramente gli inconvenienti dovuti al verificarsi delle piene del torrente;
- per motivi ambientali essendo la valle del torrente Vanoi un ambito paesaggisticamente di grande pregio e questo tipo di struttura consente certamente di contenere l'impatto ambientale delle opere.

Dopo il completamento della sistemazione con le controbriglie non si sono più manifestati ulteriori fenomeni di scalzamento delle opere, anche se non sono mancati eventi alluvionali di notevole intensità come, il già ricordato evento del Novembre 2000. In figura 6 si riporta un esempio del profilo di fondo di un tratto d'alveo sistemato con le nuove controbriglie.

Fig. 4: Torrente Val Calcara: tratto sistemato lungo la conoide
Fig. 4: Val Calcara torrent along the fan

Fig. 5: Torrente Vanoi: particolare di un tratto con briglia e controbriglia
Fig. 5: Vanoi torrent: view of the check-dams with the subsidiary check-dams

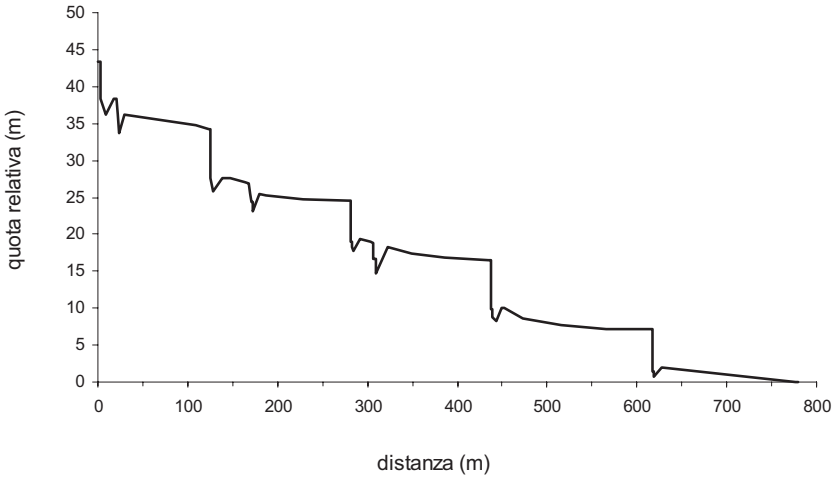

Fig. 6: Profilo di fondo del torrente Vanoi sistemato con briglie e controbriglie
Fig. 6: Bed profile of the Vanoi torrent after the check-dams construction

Per le tre situazioni sistematorie presentate si è proceduto ad un rilievo della granulometria dell'alveo mediante indagine numerale eseguita con il metodo del grid-by- number. Si è inoltre condotto mediante autolivello e cordella (torrenti Calcara e Fersina) o stazione totale (torrente Vanoi) il rilievo di dettaglio del profilo longitudinale dei tratti di corsi d'acqua sopra descritti. Si riassumo in tabella 2 i risultati delle indagini effettuate, includendo anche il valore della pendenza (i_0) del tratto di torrente prima della sistemazione, la larghezza media della sezione di deflusso della gaveta (B), l'interdistanza media (L) tra le opere e la loro altezza media (Z), valutata come dislivello fra la quota della gaveta e la quota del fondo del torrente a valle della pool erosiva.

Tab. 2: Principali caratteristiche dei tratti sistemati (d_{xx} : diametro per il quale *xx*% in numero dei ciottoli campionati è più fine; * valore a monte della soglia di derivazione ad uso idroelettrico, Fig. 3a; ** valore a valle della soglia di derivazione; Fig. 3b)
Tab. 2: Main characteristics of the stabilized torrent reaches

Torrente	d_{50} (mm)	d_{90} (mm)	i_o (m/m)	i_c (m/m)	B (m)	Z (m)	L (m)
Fersina	85	347	0.100	0.000	12.0	1.6* - 2.3**	17* - 31**
Vanoi	72	277	0.056	0.014	57.5	5.7	120
Val Calcara	33	133	0.175	0.138	8.5	1.7	45

UNA STIMA ANALITICA DELLA PENDENZA DI CORREZIONE

I valori delle pendenza di compensazione rilevata (Tab.2) possono essere confrontati con quelli che potrebbero essere desunti mediante l'approccio deterministico basato sul criterio del moto incipiente. Scegliendo di fare riferimento al d_{90} rilevato in alveo e assumendo la sezione del corso d'acqua di forma rettangolare molto larga, la pendenza di compensazione può essere espressa in modo esplicito mediante la relazione:

$$i_c = \left[\frac{\tau_c^* \, d_{90} \, K_s^{3/5} \, B^{3/5} (\rho_s - \rho)}{Q^{3/5} \, \rho} \right]^{10/7} \tag{3}$$

ove, oltre ai simboli già introdotti (i_c in m/m, d_{90} e B in m), valgono le seguenti notazioni:
τ_c^*: sforzo tangenziale adimensionale di Shields;
K_s : coefficiente di scabrezza del fondo secondo Strickler ($m^{1/3}/s$);
Q : portata liquida (m^3/s) per la quale si impone il limite di inizio del movimento del d_{90}.

Tenendo conto delle taglie granulometrie in esame, una valutazione prudenziale dello sforzo τ_c^* relativo al d_{90} (sedimento con maggiore protrusione rispetto al fondo) può portare ad assumere un valore pari a 0.04 (Komar, 1988) e un valore di K_s da stimare mediante la relazione proposta da Bray (1979):

$$K_s = \frac{20.1}{d_{90}^{1/6}} \tag{4}$$

L'eq.(4) non tiene conto della maggiore resistenza al moto che si genera quando il flusso è in condizioni di bassa sommergenza e si entra in un regime di macroscabrezza. In queste condizioni un minore valore di K_s porterebbe, quindi, secondo l'eq.(3), a valori ancora più ridotti di i_c. Per l'applicazione dell'eq.(3) si è eseguito il calcolo degli idrogrammi di piena dei tre bacini in esame, avendo come obiettivo la stima dei valori al colmo di questi idrogrammi per differenti tempi di ritorno. Il calcolo idrologico è avvenuto utilizzando l'idrogramma unitario proposto dal Soil Conservation Service (1972), dopo aver preventivamente stimato i valori medi di CN dei rispettivi bacini. I pluviogrammi considerati si sono desunti dalla regolarizzazione statistico-probabilistica dei dati delle stazioni pluviografiche di riferimento (Trento, Pergine, Borgo Valsugana, Caoria) ed assumendo per ciascun tempo di ritorno una precipitazione di intensità costante e di durata pari al tempo di corrivazione del bacino (tab. 1 e eq.2).

Le portate al colmo ottenute sono state quindi inserite nell'eq.(3) per il calcolo di i_c. Si riporta in tabella 3 la sintesi dei risultati ottenuti.

Tab. 3: Portate al colmo calcolate (Q) e relative pendenze di correzione (i_c) calcolate mediante l'eq.(3); il pedice di Q indica il tempo di ritorno dell'evento.
Tab. 3: Computed peak discharges (Q) and related correction slopes (i_c) by way of eq.(3); the subscript of Q refers to the return period of the event

Torrente	Q_2 (m^3/s)	i_c (m/m)	Q_{10} (m^3/s)	i_c (m/m)	Q_{20} (m^3/s)	i_c (m/m)	Q_{50} (m^3/s)	i_c (m/m)	Q_{100} (m^3/s)	i_c (m/m)
Fersina	13.4	0.063	31.8	0.030	39.9	0.025	51.2	0.020	60.0	**0.017**
Vanoi	43.8	0.063	88.6	0.035	107.9	0.029	134.3	**0.025**	155.0	**0.022**
Val Calcara	0.8	**0.156**	2.1	0.068	2.6	0.055	3.5	0.043	4.2	0.037

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Un confronto diretto fra la pendenza i_c rilevata in campo (tab.2) con i valori teorici riportati in tabella 3 e dedotti in assenza di trasporto solido permette di formulare alcune osservazioni di un certo interesse in merito al ruolo che il regime di trasporto solido assume nella stima di i_c. Il torrente Fersina, che è stato corretto con pendenza pressoché nulla, rispecchia una scelta sistematoria molto cautelativa, giacché sarebbe risultata sufficiente una pendenza dell'1.7% (tab.3) per rendere stabile l'alveo anche per un evento di piena a carattere centennale. Il confronto con il valore teorico non è però privo di significato, poiché mette in evidenza come un ricorso eccessivo a consolidamenti con step e pool artificiali, potrebbe comportare, a fronte di un'elevata stabilità indotta localmente sul tratto, un'eccessiva riduzione degli apporti solidi in transito (G_s).

La pendenza di correzione (1.4%) che si è dovuta assegnare al torrente Vanoi, intervenendo in un secondo tempo con l'inserimento delle controbriglie, risulta ancora più contenuta del valore teorico (2.2-2.5%, tab.3) associato alla piena con tempo di ritorno di 50-100 anni. Questa circostanza sottolinea l'importanza di G_s nella stima di i_c: nel caso specifico si verificano, infatti, eventi di piena che, a causa dell'entità delle portate in gioco e delle granulometrie grossolane del letto, presentano concentrazioni solide piuttosto contenute. In queste circostanze, se le esigenze di sicurezza idraulica lo richiedono, sembra appropriato l'utilizzo della eq.(3) ottenuta per acqua chiara, prevedendo tempi di ritorno di almeno 50 anni ed utilizzando valori non eccessivamente elevati di K_s. Per il Vanoi, ad esempio, inserendo nell'eq.(3), K_s=15 $m^{1/3}/s$, anziché il valore desunto dall'eq.(4), si ottiene una buona congruenza fra il valore osservato e quello teorico.

Una situazione diametralmente opposta a quella del Vanoi è infine quella del piccolo bacino della Val Calcara. In questo caso il corso d'acqua ha un carattere effimero e i sedimenti, a causa delle condizioni litologiche, presentano dimensioni piuttosto contenute (tab.2). I deflussi di piena significativi, quando si manifestano, sono accompagnati da un trasporto solido avente la forma di una corrente iperconcentrata o, addirittura, di una colata detritica. L'alta concentrazione degli apporti solidi in gioco sortisce l'effetto di ridurre intorno ai 2-5 anni (tab.3) il tempo di ritorno da associare alla portata liquida dell'equazione teorica (3), dedotta in assenza di trasporto solido. In quest'ultimo caso, inoltre, non solo l'assunzione di un valore di i_c più contenuto (per esempio collegato alla Q_{50}) avrebbe comportato maggiori oneri di intervento, ma avrebbe anche determinato un risultato incompatibile con gli obiettivi funzionali della sistemazione. Assai verosimilmente, infatti, una pendenza del 3-4% combinata con la presenza dei salti di fondo avrebbe causato il deposito dei sedimenti lungo tutto il tratto, inducendo il pericolo di un sovralluvionamento.

Gli esempi di consolidamento esaminati sono relativi a situazioni che si sono dimostrate soddisfacenti relativamente alla scelta della pendenza di correzione. Da un confronto fra la pendenza sulla quale questi tratti sistemati si sono assestati e i valori che potrebbero desumersi applicando un classico criterio del moto incipiente (eq.3) emerge, in definitiva, l'influenza dominante del regime di trasporto solido. Non tenere conto di questo aspetto (eq.1) può comportare un inutile aggravio dei costi della sistemazione e, soprattutto, la realizzazione di un intervento che non risponde alle specifiche esigenze di sicurezza e di protezione del territorio.

BIBLIOGRAFIA

Benini G. (2000): "Sistemazioni idraulico-forestali". Utet, Torino.

Bray D. G. (1979): "Estimating average velocity in gravel bed rivers". *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, 105(HY9), 1103-1122.

Calamini G., Falciai M., Silvani G. (1978): "Ricerca sul pendio di stabilimento di alcuni torrenti della Val di Sieve e dell'Alto Arno". *L'Italia Forestale e Montana*, 33(6), 257-267.

Cerato M. (1999): "Contributi per una storia delle sistemazioni idrauliche e forestali in Valsugana". Coordinamento editoriale G. Gorfer, Provincia Autonoma di Trento.

D'Agostino V., Cerato M., Da Re F., Lenzi M.A. (1997): "La sistemazione dei torrenti con briglie in massi". *Dendronatura*, 18(2), 39-50.

Della Lucia D., Fattorelli S., Nardin D., Provasi C., Tomasetti R. (1980): "Ricerca sulla determinazione della pendenza di compensazione nei torrenti del trentino". Provincia Autonoma di Trento, Azienda Speciale di Sistemazione Montana.

Ferro V. (2002): "La sistemazione dei bacini idrografici". McGraw-Hill, Milano.

Ferro V., Giordano G., Iovino M. (1996): "Approfondimenti teorici e verifiche sperimentali del criterio del moto incipiente per la valutazione della pendenza di sistemazione dell'alveo". *Scritti dedicati a Giovanni Tournon*, AIIA, 143-156.

Komar P.D. (1988): "Sediment transport by floods". In: Beven K.J, Carling P.A. (eds), *Floods: hydrological, sedimentological and geomorphological implications*. Chichester: Wiley, 107-134.

Lane E.W. (1955): "The importance of fluvial morphology in hydraulic engineeering". *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 81, 1-17.

Pica M., Preti F. (1999): "Criteri di previsione della pendenza di alvei stabili". *Quaderni di Idronomia Montana*, 19/1, 139-148.

Provincia Autonoma di Trento – Servizio Azienda Speciale di Sistemazione Montana (2001): "Relazione sull'attività svolta nel 2001". Luglio 2001, Centro duplicazioni della Giunta.

Santoro M., Ferro V. (1993): "Procedimenti per la valutazione della pendenza di compensazione: confronto tra teorie ed esperienze". *Atti dell'Accademia Nazionale delle Scienze, Lettere e Arti di Palermo*, Serie V, 9 (parte I), 199-233.

Soil Conservation Service (1972): "National Engineeering Handbook, section 4, Hydrology". Washington D.C.

Thiery E. (1914): "Restauration des montagnes, correction des torrents, reboisement". Béranger, Paris.

Valentini C. (1912): "Sistemazione dei torrenti e dei bacini montani". Hoepli, Milano.

Watson C. C., Biedenharn D.S. (1999): "Design and effectiveness of grade control structures in incised river channels of north Mississippi". In: S.E. Darby e A. Simon (eds.), *Incised River Channels*, Wiley, Chicester, 395-422.

Woohlhiser D.A., Lenz A.T. (1965): "Channel gradient above gully-control structures". *Journal of Hydraulics Division*, ASCE, 91(HY3), 165-187.