

VINCENZO D'AGOSTINO
MARIO CERATO
FABIO DA RE
MARIO A. LENZI

La sistemazione idraulica dei torrenti con briglie in massi

Introduzione

La progettazione delle sistemazioni dei torrenti presuppone una programmazione di interventi diversificati all'interno del bacino. Le cause di questa diversificazione sono da ricercarsi innanzi tutto nei più avanzati mezzi tecnici e nelle superiori conoscenze disponibili che consentono di attuare interventi sempre più adeguati agli obiettivi per cui vengono realizzati. Gli obiettivi della sistemazione, che poi ne condizionano la progettazione, sono la chiara definizione di cosa si intende tutelare, contro quale pericolo e, molto importante, in quale misura. Una corretta opera di sistemazione deve contrapporre all'individualità dei corsi d'acqua una serie di interventi di tutela integrati nei processi naturali e tali da armonizzare il bisogno di protezione dell'uomo con il bisogno di protezione dell'ambiente (KETTL, 1994).

È certamente innegabile che ogni intervento in una realtà complessa, quale quella di un torrente, alteri in qualche misura, l'equilibrio delle comunità biotiche ad esso legate (vegetazione, fauna, microfauna) e quindi la sua stabilità ecologica. D'altra parte altrettanto innegabile è la necessità di difendere abitati e infrastrutture potenzialmente interessati dai fenomeni alluvionali, che in una area montana sono assolutamente "naturali" e destinati a ripetersi con una certa ciclicità (DELLA GIACOMA *et al.*, 1991).

L'attuale orientamento per una sistemazione dei collettori montani che risulti il più possibile in armonia con l'ecosistema

attraversato prevede l'utilizzo combinato di tecniche di ingegneria naturalistica ed il ricorso a metodi di "ricostruzione" morfologica del corso d'acqua che risultino il più possibile compatibili con la naturale tendenza dello stesso a raggiungere, nel lungo periodo, una configurazione stabile (KONDOLF, 1996). Tali criteri non devono essere applicati in modo generalizzato e devono essere affiancati agli interventi strutturali di tipo tradizionale (D'AGOSTINO, 1996). Questi ultimi sono infatti insostituibili sia nel contrastare le situazioni di dissesto più marcate (come rapide fasi di erosione ed incisione dell'alveo, colate detritiche, stabilizzazione di frane che determinano forti spinte) sia in situazioni in cui si debba garantire la sicurezza della popolazione. I due aspetti naturalistico-geomorfologico e quello classico strutturale devono perciò compenetrarsi, assumendo pesi differenti all'interno del intervento sistematorio a seconda del grado di protezione richiesto, del tempo di ritorno dell'evento di progetto e degli obiettivi fissati in fase di pianificazione.

Gli interventi di ingegneria biologico-naturalistica mirano soprattutto a ripristinare la funzionalità ecologica del corso d'acqua, essenzialmente attraverso la riaffermazione della vegetazione riparia che, una volta insediata, può assolvere efficacemente ad una molteplicità di funzioni (SCHWEITZER, 1995).

Gli aspetti di rinaturalizzazione legati ad una "ricostruzione" morfologica del corso d'acqua, risultano, a livello attuativo, molto meno diffusi degli interventi di ingegneria biologico-naturalistica. Tuttavia, nell'am-

bito della comunità scientifica e di alcuni enti operativi che hanno competenze specifiche in questo settore, ha subito negli ultimi anni un notevole impulso la ricerca volta da una parte a proporre delle varianti costruttive delle briglie tradizionali e, dall'altra, allo studio delle condizioni di formazione e di stabilità di alcune unità morfologiche naturali (riffle pool, step pool).

Specie le tradizionali briglie di consolidamento, che prevedono la riduzione della pendenza attraverso una serie di opere in calcestruzzo disposte in cascata (BENINI, 1990), sono state recentemente realizzate impiegando briglie costruite con grossi massi. In qualche caso vecchie briglie di consolidamento in calcestruzzo sono state addirittura riconvertite in briglie in massi o rampe (REGIONE EMILIA ROMAGNA e REGIONE DEL VENETO, 1993). In questo modo si è inteso ridurre l'effetto di artificializzazione dell'alveo, determinato dal calcestruzzo, mantenendo simultaneamente saldi i principi e gli obiettivi sistematori. Tali interventi risultano particolarmente appropriati in ambienti ad elevata valenza turistico-ricreazionale ma, più in generale, determinano una maggiore naturalità della sistemazione in molti torrenti nel cui letto siano già presenti massi di una certa pezzatura.

Un ulteriore affinamento della fase progettuale delle briglie in massi può essere compiuto, tenendo conto della similarità esistente tra la morfologia delle unità fisiografiche a "step" e "pool" e le opere di consolidamento tradizionali. Il profilo longitudinale dei tratti a step pool, detto appunto a gradinata, ha infatti le sembianze di una serie di briglie di consolidamento. L'interdistanza tra i gradini ("step") di una sequenza è determinata, oltreché dalla pendenza del torrente, dalla altezza degli step e dalla granulometria del letto, anche dall'entità delle piene formative che li hanno generati (D'AGOSTINO, LENZI, 1997). La stessa strutturazione d'alveo che si osserva negli step pool appare come il punto di arrivo di un processo di evoluzione naturale tendente ad una certa stabilità del torrente (D'AGOSTINO, LENZI, 1997). Fare riferimento e trarre spunto dagli aspetti peculiari di tale

morfologia significa dunque cogliere il risultato finale di complesse interazioni naturali tra aspetti di carattere idraulico, sedimentologico e geomorfologico, per poi applicarli in modo corretto in sede progettuale e di "riedificazione" mirata dell'alveo.

Nel lavoro verranno illustrate le tipologie costruttive correntemente in uso per la realizzazione di opere in massi. Verrà quindi descritto, con riferimento ad una sistemazione idraulica eseguita nella Provincia di Trento, un caso esemplificativo di progettazione di queste opere condotta con l'utilizzo di criteri geomorfologici oltreché sistematori.

Tipologie costruttive e campi di impiego delle briglie in massi

Tra le opere di consolidamento realizzate facendo ricorso all'utilizzo di massi di grosse dimensioni si possono annoverare le briglie in calcestruzzo rivestite in massi, le traverse in massi ancorati al fondo per mezzo di micropali e le briglie in massi a secco o semplicemente cementati.

Già dalla fine degli anni '70 si era dato il via alla realizzazione di opere in massi ciclopici a secco e in massi cementati, senza per questo eseguire alcuna lavorazione di squadratura degli stessi ed usandoli direttamente grezzi così come potevano essere reperiti nel torrente, nelle sue vicinanze o provenienti da cave di prestito. Questi primi lavori sono stati eseguiti sfruttando le crescenti capacità operative offerte dall'evoluzione delle macchine "escavatrici".

L'utilizzo di massi ciclopici nelle sistemazioni idraulico-forestali era prevalentemente orientato alla realizzazione di opere longitudinali di difesa spondale (scogliere e pennelli). Se ne è fatto comunque uso anche nelle situazioni idrauliche e di dissesto meno problematiche, dove la sistemazione si concretizzava tramite l'edificazione di briglie in massi grezzi a secco o, più frequentemente, cementati. Nell'esecuzione di tali opere si è potuto ridurre drasticamente l'impiego di manodopera, ottenendo in tal modo una diminuzione dei costi rispet-

to ad una sistemazione tradizionale. Per contro questi interventi non erano e non sono applicabili in circostanze più complesse, come ad esempio nei torrenti ad elevata pendenza che si trovano generalmente a competere con eccessi energetici ai quali rispondono con repentini cambiamenti plano-altimetrici, elevato trasporto solido al fondo o colate detritiche. L'impiego di tali tipologie costruttive è inoltre condizionato da alcuni limiti di carattere tecnico. Risulta infatti complicato superare determinate altezze del corpo dell'opera (2÷2.5 m), anche in considerazione del fatto che la robustezza della struttura è assicurata prevalentemente dalla dimensione dei massi. Non trascurabile è poi la durabilità nel tempo che appare un po' più limitata rispetto quella delle traverse tradizionali in calcestruzzo.

Per ovviare almeno in parte ai limiti d'impiego propri delle briglie in massi a secco o semplicemente cementati, si sono allora ricercate nuove tipologie costruttive che garantissero una maggiore robustezza al passaggio di piene violente e/o di colate detritiche anche per altezze d'opera più elevate. Contemporaneamente si è tentato di incrementarne la durabilità nel tempo, di mantenere i costi di realizzazione entro limiti contenuti e paragonabili con quelli delle briglie tradizionali e di ottenere un migliore mascheramento del calcestruzzo visibile tra gli interstizi.

Nel tentativo di coniugare tutti gli obiettivi sopra esposti, l'Azienda Speciale di Sistemazione Montana della Provincia di Trento ha sviluppato, a partire dal 1990, un tipo di intervento che è ora diffusamente impiegato nel Trentino Orientale. Trattasi di traverse con scheletro in calcestruzzo armato al quale sono saldamente legati ed ancorati massi ciclopici grezzi (fig.1). Questa tipologia ha subito nel tempo alcune evoluzioni, finalizzate al risparmio di calcestruzzo ed alla ricerca di una maggiore semplicità costruttiva. Così nelle prime briglie si realizzava un particolare manufatto di ancoraggio in calcestruzzo, opportunamente sagomato e forato, sul quale si fissavano con funi metalliche i grossi massi che formavano il paramento a valle ed il coronamento dell'opera (fig. 1-A). In questo

modo si doveva realizzare una vera e propria briglia di tipo tradizionale, con relative casserature e con lunghi tempi di esecuzione. In seguito si è preferito porre in opera i blocchi lapidei direttamente durante la fase di getto del calcestruzzo, ottenendo così una maggiore coesione fra le parti e una riduzione dei tempi di lavoro, mentre la casseratura veniva realizzata solamente per la parte di monte dell'opera (fig. 1-B). Nelle ultime opere la casseratura di monte è stata sostituita dalla realizzazione di una scogliera rudimentale a sostegno del fronte di scavo (fig.1-C). In questo modo si ottiene un minore volume di scavo, una maggiore sicurezza per le maestranze ed una riduzione dei tempi di esecuzione del manufatto. Terminata la fase di scavo si provvede alla posa in opera della prima fila di massi, con disposizione ad arco, ed al getto di circa 20 cm di magrone. Viene poi realizzata l'armatura in ferro, attorno alla quale si fanno passare le funi d'ancoraggio. I massi vengono quindi posati per file successive, forandoli e legandoli, tramite le funi, alla armatura retrostante. Si forma così una particolare casseratura nella quale viene gettato il calcestruzzo. Tale tipologia costruttiva è oramai quella più comunemente utilizzata nella Provincia di Trento e permette di ottenere opere di una notevole robustezza e durabilità.

Alcune sistemazioni eseguite con questo tipo di opere sono già state sottoposte a severi collaudi da parte di piene con tempi di ritorno di 20-30 anni e persino da colate detritiche. È significativo ad esempio ricordare l'evento alluvionale del 14 Settembre 1994, che, sul torrente Cismon, ha provocato colate detritiche su alcuni affluenti e un ingente trasporto solido sull'asta principale. In questa occasione si sono registrati danni al coronamento di briglie tradizionali mentre le opere in massi del tipo descritto non hanno subito alcun danno, nemmeno le briglie localizzate su di un affluente, il rio Val Male, interessato da una colata detritica.

Analizzando poi l'aspetto puramente economico, i costi di tali opere si possono collocare tra quelli più ridotti delle briglie

tradizionali in solo calcestruzzo (armato od a gravità) e quelli più elevati delle traverse in calcestruzzo rivestito in pietra naturale.

Le briglie in massi semplicemente cementati sono ovviamente una semplifica-

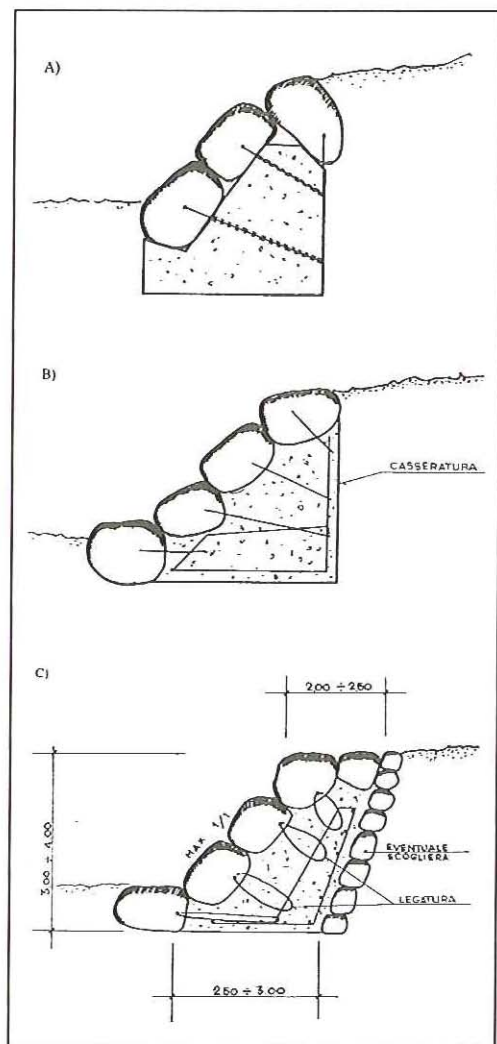


Fig.1 - Evoluzione nel tempo delle briglie con scheletro in c.a. rivestite in massi legati ed ancorati: A) massi legati dopo la realizzazione del corpo in calcestruzzo, opera completamente casserata prima del getto; B) massi posati direttamente durante la fase di getto e legati con funi d'acciaio ancorate direttamente al ferro di armatura, opera casserata unicamente sul paramento di monte; C) massi disposti preventivamente ad arco ed ancorati alla armatura, casseratura realizzata con una rudimentale scogliera (tipologia più correntemente in uso presso l'Azienda Speciale di Sistemazione Montana di Trento).

zione della tipologia illustrata in figura 1-C: la casseratura a monte non viene quasi mai eseguita, non è presente alcuna armatura e legatura ed i volumi del calcestruzzo sono notevolmente ridotti, poiché il corpo dell'opera retrostante il paramento di valle è ridotto al minimo necessario a collegare strutturalmente i massi e a dare una certa monoliticità alla briglia. I volumi costruttivi di calcestruzzo sono dell'ordine di $2 \div 4 \text{ m}^3$ per metro quadro di paramento di valle messo in opera per le opere legate (fig. 1) e scendono a valori di $0,5 \div 1,5 \text{ m}^3$ per le opere semplicemente cementate. È opportuno precisare che le opere in massi legati con scheletro in c.a. risultano staticamente sovrabbondanti (le basi di appoggio sono di larghezza pari o superiore all'altezza dell'opera) e le volumetrie di calcestruzzo impiegate sono superiori rispetto a quelle richieste dalle briglie tradizionali (in media queste necessitano di $2 \div 2,5 \text{ m}^3$ per metro quadro di paramento di valle in opera). D'altra parte i volumi di calcestruzzo richiesti dalle opere in massi legati non possono essere ridotti oltre il limite imposto dalle necessità costruttive.

Le tipologie di opere prese in esame non sono esenti da limiti d'impiego e necessitano di particolari accorgimenti in fase esecutiva. Il loro utilizzo è raccomandabile in alvei caratterizzati da una distribuzione eterogenea e grossolana del materiale di fondo. Infatti, qualora nel letto mancassero grossi massi, si otterrebbe un effetto percettivo della sistemazione assolutamente artificiale, e forse peggiore di quello conseguibile con le opere tradizionali. In simili circostanze si presenterebbe la necessità di importare tutti i blocchi lapidei da altre località con conseguente aumento dei costi. Inoltre, nel caso in cui sia conveniente reperire in loco una notevole quantità di massi a causa di un cantiere di difficile accesso, occorre porre attenzione a non depauperare ed indebolire eccessivamente la struttura originaria del letto del torrente. Si consideri infine che per la realizzazione di queste briglie sono necessari uno o più mezzi per il movimento terra, per eseguire gli scavi di fondazione e per il posizio-

namento dei massi, e che l'edificazione delle opere ha un limite costruttivo nell'altezza del corpo briglia a quota delle gàveta (3, massimo 4 m).

Per contro sono evidenti alcuni vantaggi, tra i quali si annoverano la notevole velocità di costruzione e l'alto grado di stabilità delle opere. Abbreviare il tempo che intercorre fra gli scavi di fondazione e l'ultimazione dell'opera significa anche ridurre i possibili inconvenienti dovuti al verificarsi di eventi piovosi intensi ed evitare onerose deviazioni della portata idrica. Ulteriori benefici di carattere economico ed ambientale si ottengono dal basso utilizzo di manodopera (sono sufficienti 3, 4 operai) e dall'ottimo inserimento ambientale della briglia. La possibilità di vincolare i massi con la fune d'acciaio ad una struttura in c.a. consente di intasare di calcestruzzo solo la parte più interna degli interstizi fra i massi, mantenendo al contempo una buona monoliticità complessiva della struttura. Si evita così di veder affiorare sul paramento di valle il calcestruzzo, che conferirebbe all'opera un aspetto meno naturale. L'inserimento ambientale dell'opera può essere anche migliorato variando l'orientazione dei massi sul paramento e disponendoli in modo un po' irregolare.

Dalle esperienze acquisite si elencano di seguito alcuni particolari costruttivi da considerare in fase esecutiva:

- utilizzare nel posizionamento dei massi ciclopici operatori addetti all'escavatore con provata abilità professionale nell'edificazione di manufatti in massi grezzi;
- utilizzare un escavatore di peso e potenza medio elevati, con caratteristiche adeguate al maneggio dei blocchi su terreno sconnesso (carro rinforzato, benna adatta alla costruzione di scogliere e possibilmente dotata di due snodi sul braccio);
- impiegare calcestruzzo con buone caratteristiche di resistenza e massi di sufficiente compattezza;
- ottimizzare l'aggrappo del calcestruzzo ai massi, lavandoli accuratamente ed eliminando ogni impurità superficiale prima della messa in posa;

- posizionare la fune d'acciaio, che ancora i massi alla struttura in calcestruzzo armato, nella parte retrostante ai blocchi stessi in modo da poterla inglobare completamente nel calcestruzzo;
- fare uso di un perforatore montato su mezzo semovente nell'operazione di foratura dei massi, specie se le opere sono di grandi dimensioni.

Osservando il comportamento idraulico delle numerose sistemazioni eseguite con questi tipi di briglie, nell'interezza delle varianti tecniche applicate, si possono annotare dei suggerimenti utili da tenere in considerazione nella fase di progettazione ed esecuzione. Così una pianta ad andamento arcuato ed una gàveta a corda molle sono funzionali nel mantenere la corrente al centro dell'alveo, specie in condizioni di magra. Un paramento di valle verticale è da preferirsi rispetto ad uno inclinato, che accentua la profondità del gorgo in vicinanza al piede dell'opera. Inoltre, quando è possibile scegliere fra una sistemazione con opere piuttosto alte (comunque non superiori ai 4 m) ed opere più frequenti e basse, è in genere preferibile quest'ultima soluzione sia sotto l'aspetto funzionale che economico. Le ali, porzioni dell'opera di più difficile esecuzione ma di estrema importanza, vanno ben dimensionate ed ammortate onde evitare fenomeni di aggiramento.

Un'altra tipologia d'intervento di nuova concezione è rappresentata dalle traverse in massi ancorati al fondo per mezzo di micropali. Queste opere idrauliche sono state progettate e realizzate recentemente dai Servizi Forestali di Belluno. La fase esecutiva si diversifica a seconda che si intendano sistemare alvei piuttosto stretti ed incassati o alvei abbastanza larghi.

Per alvei piuttosto stretti si effettuano dei fori (del diametro di 100 mm) con una trivella da campo, spingendosi ad una profondità variabile dai 5 ai 12 m in funzione della consistenza e dell'altezza d'immersione dello strato roccioso di base. In questi fori si inseriscono dei micropali fessurati in cui si introduce una fune d'acciaio del diametro di 18÷20 mm che viene successivamente fissata tramite iniezione cementizia. I

micropali vengono disposti a scacchiera su due file parallele ed ogni masso (di circa 1 m³), precedentemente forato, viene ancorato alla fune d'acciaio impiegando una malta "antiritiro". Si ottiene così una struttura concatenata, stabile e ben ammorsata.

Per alvei piuttosto larghi si forano i blocchi lapidei, vi si introduce la fune metallica, la si cementa ai massi ed infine se ne fissano le estremità agli anelli di testa di due micropali localizzati in corrispondenza alle sponde del torrente. Codesto tipo di intervento è caratterizzato, rispetto al precedente, da una maggiore elasticità della struttura, la quale potrebbe risultare ancor più flessibile se i blocchi non fossero saldati rigidamente alla fune.

Sulla robustezza e sulla funzionalità idraulica di queste ultime tipologie poco si può dire in considerazione del fatto che non sono ancora occorsi eventi di piena tali da sottoporle ad un severo collaudo. Si ritiene tuttavia che le opere in massi fondate su micropali si collochino idealmente, sotto il profilo della loro stabilità in alveo, un poco al di sotto delle briglie in massi e cemento armato (fig. 1-C) e decisamente al di sopra delle opere semplicemente cementate.

Nella scelta fra le differenti tipologie di briglie in massi prese in esame risultano determinanti gli obiettivi di protezione ed il genere dei beni da proteggere (zona residenziale, infrastrutture, superficie agricola estensiva od intensiva, paesaggio naturale). È allora logico ipotizzare un grado di protezione più alto per i beni di valore elevato e un grado di protezione minore per le superfici con conduzione agrosilvopastorale, tralasciando in tal modo il concetto oramai superato del dimensionamento standard per una piena con tempo di ritorno centennale (UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE, 1995). Ad esempio, quando è richiesta una sicurezza idraulica per eventi di piena con tempi di ritorno di 30+50 anni, ammettendo di limitare i danni delle piene centennali, le opere in massi semplicemente cementati possono rappresentare una valida soluzione. In passato l'impiego delle briglie in massi a secco era più limitato in virtù del fatto che piene di notevole intensi-

tà tendevano a modificarne la struttura costruttiva originaria. Nel concetto tradizionale della sistemazione e del sistematore questa modificazione non era e non è accettata e viene tuttora considerata come un fallimento. Per contro anche le forme di fondo naturali ("step" e "riffle-step": gradini e corte rampe naturali), che indicano di per sé una condizione di stabilità piuttosto duratura, subiscono delle modificazioni (alcune traslano, altre si interrisono, altre ancora si riformano in differenti tratti del torrente) durante gli eventi di piena di intensità medio-elevata (D'AGOSTINO, LENZI, 1997). È pertanto da superare, nel caso sia ad esempio realizzabile un intervento ben calibrato di sistemazione a gradinata con briglie in massi a secco, il complesso del fallimento. Sarà piuttosto da ammettere preventivamente che, per una piena di particolare intensità e avendo comunque garantito un controllo dell'erosione, si verifichino assestamenti, modificazioni ed anche parziali danneggiamenti delle opere. Quando invece, per gli obiettivi di protezione e per le caratteristiche della sistemazione, non sia possibile accettare una mutazione dei manufatti, si dovranno utilizzare opere in massi legati con scheletro in c.a. o briglie di tipo più tradizionale.

Alla luce di queste considerazioni sul grado di protezione richiesto e considerando al contempo il tipo di trasporto solido ed alcuni parametri geomorfologici di base del torrente viene proposto in tabella 1 un quadro schematico dei campi di impiego delle principali tipologie di briglie in massi.

Una sistemazione d'alveo condotta secondo criteri geomorfologici

Negli anni 1996 e 1997 l'Azienda Speciale di Sistemazione Montana della Provincia Autonoma di Trento, con la collaborazione scientifica dell'Università di Padova, ha eseguito un intervento di sistemazione idraulica su alcuni tratti di un torrente montano, il Maso di Spinelle, facendo ricorso ad opere di consolidamento dell'al-

Tab. 1 - Schematizzazione dei campi di impiego delle diverse tipologie di briglie in massi.

Briglie in massi a secco	Briglie in massi semplicemente cementati	Briglie con scheletro in c.a. rivestite in massi legati
<i>caratteristiche del tratto di torrente da sistemare</i>		
<ul style="list-style-type: none"> - pendenze fino al 12-14 % - granulometria del materiale superficiale: <ul style="list-style-type: none"> a) ampia e completa (eterogenea) b) con una presenza consistente di massi di grosse dimensioni - morfologia: presenza di sequenze a step pool c/o a riffle pool nello stesso torrente o nei suoi affluenti - trasporto solido: <ul style="list-style-type: none"> 1. di fondo - abbondante presenza di grossi massi in posto 	<ul style="list-style-type: none"> - pendenze fino al 18-20% - granulometria del materiale superficiale: <ul style="list-style-type: none"> a) abbastanza graduata b) anche con prevalenza di ghiaia e ciottoli ma con la presenza di una certa quantità di massi - morfologia: presenza anche di brevi sequenze a step pool e/o a riffle pool nello stesso torrente o nei suoi affluenti; morfologia poco alterata da precedenti interventi - trasporto solido: <ul style="list-style-type: none"> 1. di fondo; 2. iperconcentrato - discreta disponibilità di massi in posto 	<ul style="list-style-type: none"> - pendenze fino al 18-20% - granulometria del materiale superficiale: <ul style="list-style-type: none"> a) anche piuttosto uniforme b) anche con prevalenza di sabbia, ghiaia e ciottoli di piccole dimensioni - morfologia: già alterata da precedenti interventi - trasporto solido: <ul style="list-style-type: none"> 1. di fondo; 2. iperconcentrato; 3. colate detritiche a basso impatto dinamico - media o relativamente scarsa disponibilità di massi sul posto
<i>ambiente circostante la sistemazione</i>		
naturale agricolo	naturale agricolo poco urbanizzato	urbanizzato
<i>grado di sicurezza richiesto alla sistemazione</i>		
Tempi di ritorno = 20 ÷ 30 anni	Tempi di ritorno = 30 ÷ 50 anni	Tempi di ritorno > 50 anni

veo che hanno previsto l'impiego di opere trasversali in massi.

Questo tipo di intervento, dal punto di vista della semplice tecnologia costruttiva, non si discosta molto da analoghi interventi già realizzati con una certa consuetudine in ambito regionale da oltre una decina di anni.

Tuttavia questa sistemazione assume un particolare significato per il criterio proget-

tuale e metodologico che ha portato al suo concepimento.

Il torrente Maso di Spinelle forma, assieme al torrente Maso di Calamento, il torrente Maso, affluente in sinistra del fiume Brenta, nel quale confluisce in prossimità del paese di Castelnuovo. Le principali caratteristiche del bacino (fig. 2) sono sintetizzate in tabella 2.

L'alveo del torrente Maso di Spinelle ha subito, soprattutto nella parte medio bassa del suo corso, una incisione ed un approfondimento notevoli durante la piena storica dei giorni 3-4 Novembre 1966. Per inquadrare il grado di dissesto dell'alveo è sufficiente pensare che la larghezza media del letto a valle del Rivo di Caserine (fig. 2) è passata, dopo l'evento del 1966, da valori dell'ordine di 6-7 m a 35-50 m, mentre il profilo di fondo si è abbassato, in alcuni tratti, di circa 15-20 m. Conseguenze analoghe, seppur di più limitata estensione, si sono registrate anche più recentemente a seguito dell'evento di piena del 2 Ottobre 1993.

Al verificarsi di alterazioni così macroscopiche del torrente, documentate in modo eloquente anche dalle fotografie aeree scattate dopo l'evento di piena del 1966 (fig. 3), ha contribuito in modo consistente la geologia del bacino. Le formazioni geologiche della valle appartengono alla grande intrusione cristallina (magmatite) di Cima d'Asta. Nel tratto inferiore affiorano vulcaniti (in particolare in sponda destra), nel tratto superiore sono presenti metamorfiti (filladi, cornubianiti, paragneiss). Soprattutto nel tratto inferiore, tra Pontarso e la confluenza con il Rivo Caserine, l'alveo è dominato da depositi del quaternario

degradati. Molto evidenti in prossimità alle sponde sono le morene ed i depositi fluvio-glaciali ai quali frequentemente si sovrappongono i detriti di falda. Il materiale morenico ha dato luogo ad una altissima percentuale di banchi sabbiosi e sabbioso-ghiaiosi sui quali poggiano e sono dispersi dei massi di notevoli dimensioni e di diversa formazione. Alcuni di questi massi, anche delle dimensioni di alcune centinaia di metri cubi, durante gli eventi di piena del 1966 e del 1993 hanno determinato vistose deviazioni del flusso con la conseguente formazione di frane spondali.

Un tratto del Maso di Spinelle prossimo alla confluenza con il Maso di Calamento era già stato oggetto, intorno agli anni 80, di un classico intervento di sistemazione con briglie a mensola che, per la entità stessa della incisione causata dalla piena del 1966, hanno raggiunto altezze di circa 7 m. A seguito dell'evento alluvionale del 2 ottobre 1993 si è reso necessario intervenire ulteriormente per stabilizzare i tratti d'alveo più dissestati. L'abbondanza nel letto di materiale fine ed incoerente combinata con la presenza di grossi massi disposti in alveo in modo piuttosto disordinato, ha suggerito l'opportunità di realizzare una sistemazione idraulica di minor impatto e

Tab.2 - Caratteristiche del bacino idrografico del torrente Maso di Spinelle chiuso alla confluenza col torrente Maso di Calamento in località Pontarso.

Superficie del bacino:	45 km ²
Quota massima:	2561.6 m s.m.
Quota minima:	909.7 m s.m.
Altezza media:	1860 m s.m.
Pendenza media dei versanti:	50.3 %
Temperatura (T) e piovosità media annua (h _a)	
- stazione di Pontarso:	T = 7.7 ° C ; h _a = 1100 mm
- stazione di Costa Brunella:	T = 3.4 ° C ; h _a = 1300 mm
Lunghezza del collettore principale fino allo spartiacque:	10 km
Pendenza media del collettore:	13.8 %

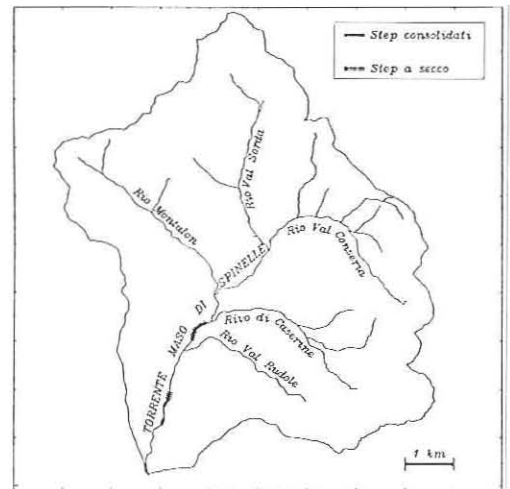


Fig. 2 - Bacino idrografico del torrente Maso di Spinelle chiuso in località Pontarso (Trento).

che valorizzasse maggiormente, anche sotto l'aspetto paesaggistico ed ambientale, il corso d'acqua.

Un primo tentativo in questa direzione è stato intrapreso subito dopo la piena del 1993, intervenendo in un tratto che aveva subito approfondimenti del letto di 10-15 m (fig. 4) e realizzando un selciato costituito da grossi massi reciprocamente legati con funi di acciaio ed appoggiati sul sottostrato sabbioso. La realizzazione di questa lunga rampa ad elevata scabrezza ha limitato in modo rilevante la artificializzazione dell'alveo assicurando d'altra parte, grazie alla corazzatura "ordita" sul letto, la sua quasi totale inerodibilità. L'unico limite di questo intervento è forse rappresentato dalla notevole quantità di mano d'opera richiesta per la perforazione dei massi costituenti il selciato.

Necessitando il corso d'acqua di stabilizzazioni in due ulteriori tratti a monte, sia per scongiurare il pericolo di nuove incisioni del letto sia per rinsaldare alcune frane di sponda prospicienti l'alveo, si è evidenziata l'opportunità di riprodurre le strutture a step pool di tipo naturale a mezzo di briglie in massi. Le condizioni predisponenti la realizzazione di questo tipo di intervento sono state: il campo di pendenze da siste-



Fig. 3 - Vista area del torrente Maso di Spinelle dopo la piena del Novembre 1966.

mare tipico dei tratti a step pool (13-14%), una disponibilità molto elevata di grossi massi nell'area di pertinenza del torrente, la possibilità di fondare queste opere su grossi massi ciclopici già presenti nel sottostrato, l'esistenza di sequenze a step pool molto ben definite su alcuni degli affluenti del Maso di Spinelle (Rivo di Caserine, Rio Val Sorda e Rio Montalon, fig. 5).

Le soluzioni costruttive adottate hanno previsto la realizzazione di briglie in massi a secco per un tratto d'alveo lungo circa 500 m localizzato a valle del Torrente Maso con il Rivo di Caserine (fig. 2) e la messa in opera di briglie in massi cementati per la sistemazione di un tratto più a valle ubicato a monte del selciato.



Fig. 4 - Torrente Maso di Spinelle: approfondimenti dell'alveo ed erosioni di sponda verificatesi a seguito dell'evento alluvionale del 2 Ottobre 1993 in corrispondenza del tratto successivamente sistemato con un selciato in massi legati.

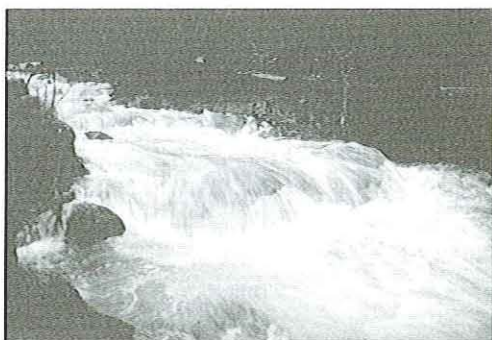


Fig. 5 - Esempio di uno step naturale sul rio Montalon, affluente del torrente Maso di Spinelle: fotografia scattata durante l'evento di piena del 14-18 Ottobre 1996.

La presenza in alveo di massi di dimensioni e peso superiori alle possibilità di movimentazione degli escavatori è stata così utilizzata:

- quando possibile si è mantenuto il loro posizionamento originario;
- a volte è stata depezzata con esplosivi la parte emergente del masso, mantenendo la parte immersa nell'alveo come fondazione; al fine di poter spezzare in modo preciso i massi, è stata impiegata polvere pirica nera che ha una forza dirompente graduale e consente di non compromettere la compattezza dei massi;
- spesso per i blocchi di maggiori dimensioni si è provveduto al depezzamento in massi di volumetrie tali da poter essere più facilmente movimentati; in alcuni casi da un unico blocco si è ottenuto un numero di massi sufficiente per la costruzione di un intero step.

L'esecuzione di quattro rilievi granulometrici, condotti in corrispondenza delle zone di intervento secondo il metodo del "grid by number" (WOLMAN, 1954) modificato (LENZI, 1992), ha permesso la scelta delle altezze più opportune da assegnare agli step (briglie). Concordemente alle massime granulometrie rilevate in alveo ($D_{100} = 1.5 \div 4$ m, fig. 6), all'altezza fuori terra delle opere (H) sono stati assegnati valori compresi fra 1 m e 3.5 m (per la maggior parte delle briglie si è cercato di mantenere il rapporto: $H / D_{100} = 1 \div 2$), con un valore più frequente di 2.5 m. L'elevata

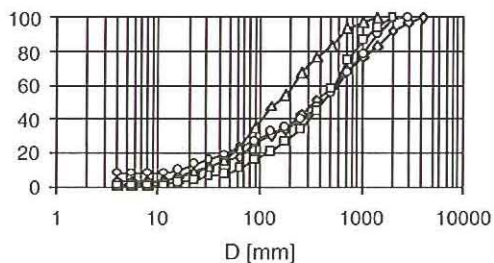


Fig. 6 - Granulometria del materiale superficiale del letto relativa a quattro siti localizzati lungo il tratto di torrente dove si sono realizzate le briglie in massi ("step consolidati" e "step a secco" indicati in fig. 2).

disponibilità in alveo di massi di dimensione notevole giustifica inoltre la scelta costruttiva di non ricorrere, né per le opere a secco né per le opere cementate, ad alcuna tecnica di legatura con funi metalliche.

La distanza fra gli step (L) si è determinata, in via preliminare, applicando la configurazione di massima resistenza riscontrata in laboratorio da Abrahams et al. (1995). Questa disposizione può esprimersi con la relazione: $L = H / (1.5 S)$, essendo S la pendenza del tratto da sistemare ed H l'altezza degli step.

Relativamente alla progettazione eseguita questo criterio non è stato applicato in forma rigida ma si è cercato di assecondare l'andamento altimetrico e planimetrico del torrente, individuando anche le sezioni che meglio si prestavano all'ammorsamento laterale delle opere o nelle quali un masso ciclopico affiorante dall'alveo andava a costituire una parte integrante della costruenda struttura.

La ripetizione del rilievo longitudinale eseguita al termine dei lavori ha infatti evidenziato il campo di lunghezze d'onda: $L = H / (1.1 \div 1.3 S)$, con distanze tra le opere comprese tra i 10 m ed i 25 m. Si è quindi sempre mantenuto, fra il piede di ciascuna opera (step) e la testa della successiva di valle un profilo longitudinale in contropendenza.

In sintonia con l'impostazione morfologica che si è data a questo tipo di intervento si è cercato di porre in opera le briglie in massi secondo geometrie non troppo regolari e ripetitive. L'impostazione di uno step in genere è avvenuta su 2 ÷ 4 massi naturali ben saldi già presenti nel letto, che si potrebbero definire "massi cardine" dello step, realizzando comunque per le restanti parti della struttura una adeguata fondazione (mediamente almeno 1.5 m di profondità). In qualche occasione, in assenza di massi cardine, oltre ad aver predisposto la fondazione si è provveduto a collegare longitudinalmente le opere posando una fila di grossi massi lungo la linea di talweg.

Sebbene le opere risultino staticamente sovrabbondanti (la larghezza alla base è mediamente pari all'altezza della briglia

valutata dal piano fondazionale) la loro stabilità strutturale è stata accresciuta, prevedendo una conformazione planimetrica leggermente arcuata verso monte. Gli step si sono inoltre difesi dall'aggiramento laterale della corrente con un ammassamento alle sponde anche dell'ordine dei 4-5 m e mettendo in opera con continuità una scogliera longitudinale in grossi massi.

Le opere di consolidamento sono risultate morfologicamente ben inserite (fig. 7), in particolare alcuni step a secco realizzati nel tratto più a monte possono essere riconosciuti con qualche difficoltà quali interventi antropici di sistemazione del torrente (fig. 8).

L'intervento descritto ha anche subito, proprio durante la fase di ultimazione dei lavori, un collaudo abbastanza severo dal punto di vista idraulico. Dal 14 al 18 Ottobre 1996 si è infatti verificato un evento meteorico di una certa intensità (dal giorno 15 al 17 in particolare la stazione pluviografica del Cruccolo ha fatto registrare una altezza di precipitazione di circa 170 mm). L'entità della portata al colmo ascrivibile all'evento è risultata di circa $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ed è stata valutata attraverso le evidenti tracce lasciate dalla corrente a monte delle briglie di consolidamento che interessano la parte terminale del torrente. Il contributo specifico di piena ($\cong 0.9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ km}^2$) colloca l'evento in un campo di tempi di ritorno compreso fra i 7 e i 10 anni. In tale occasione il comportamento sia delle opere

in massi cementati che di quelle a secco è risultato soddisfacente, non essendosi manifestati particolari cedimenti o danni alle briglie né erosioni o frammenti di sponda. Sotto l'aspetto idraulico i sopralluoghi eseguiti durante l'evento hanno anche evidenziato il comportamento dissipativo tipico delle sequenze a step pool, con la tendenza ad un quasi totale annegamento del vortice creato dal salto dello step nel successivo pool di valle in corrente lenta (fig. 9).

Conclusioni

I progressi della tecnologia costruttiva che si sono resi disponibili nei cantieri di



Fig. 8 - Tratto del torrente Maso di Spinelle sistemato con briglie in massi posati a secco.



Fig. 7 - Briglia in massi cementati realizzata sul torrente Maso di Spinelle.



Fig. 9 - Tratto del torrente Maso di Spinelle sistemato con briglie in massi cementati: fotografia scattata durante l'evento di piena del 14-18 Ottobre 1996.

sistemazione idraulica dei torrenti hanno dato un notevole impulso alla realizzazione di briglie in massi, edificate secondo molteplici modalità progettuali ed esecutive. Questa categoria di opere si presta a eseguire le sistemazioni d'alveo secondo gli usuali criteri del consolidamento a gradinata offrendo parallelamente all'intervento strutturale una maggiore naturalità. Le diverse tipologie di briglie in massi realizzabili consentono anche al progettista di scegliere il tipo di opera in funzione del grado di protezione che da essa vuole ottenere. Tuttavia, affinché l'impiego delle briglie in massi, quale alternativa all'utilizzo di opere di consolidamento più tradizionali e di maggiore impatto sul corso d'acqua, non si riduca ad un vantaggio meramente estetico e paesaggistico, si ritiene che debba essere guidato da criteri di tipo geomorfologico. Solo classificando preventivamente le unità fisiografiche che compongono il torrente oggetto di sistemazione, analizzando la granulometria dell'alveo e tenendo conto dei condizionamenti di tipo geologico, si possono desumere quegli elementi informativi sui quali basare la sistemazione idraulica. Ulteriori sforzi debbano essere compiuti nel comprendere pienamente l'in-

dividualità morfologica dei torrenti, anche nelle situazioni di non facile classificazione, poiché in questo modo potranno realizzarsi interventi sempre più funzionali e rispondenti alla dinamica torrentizia.

Ringraziamenti

Un particolare ringraziamento è rivolto a Diego Sonda per l'assistenza e la collaborazione fornita nella realizzazione di alcuni rilievi in campo.

Parte dell'attività di campagna è stata condotta con fondi Murst 60 %

Vincenzo D'Agostino *
Mario Cerato **
Fabio Da Re ***
Mario A. Lenzi *

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

** Servizio Azienda Speciale di Sistemazione
Montana- Provincia Autonoma di Trento

*** Dott. Forestale, Libero Professionista, Belluno

BIBLIOGRAFIA

ABRAHAMS A.D., LI G., ATKINSON J.F., 1995 - *Step-pool streams: adjustment to maximum flow resistance*. Water Resources Research, 31: 2593-2602.

BENINI G., 1990 - *Sistemazioni idraulico-forestali*. UTET, pp. 283.

D'AGOSTINO V., 1996 - *La rinaturalizzazione dei torrenti montani*. Quaderni del Dipartimento Territorio e Sistemi Agroforestali, Università di Padova, 33, 7 pp.

D'AGOSTINO V., LENZI M. A., 1997 - *Origine e dinamica delle morfologie a gradinata (step pool) nei torrenti alpini ad elevata pendenza*. Dendronatura, 7-38 (in stampa su questo numero).

DELLA GIACOMA F., FLORINETH F., ZOLIN G., 1991 - *Opere di sistemazione e regolazione dei corsi d'acqua, valutazione di impatto ambientale*. Dipartimento Territorio, Ambiente e Foreste, Servizio Protezione Ambiente, Ufficio per la valutazione di impatto ambientale, Provincia Autonoma di Trento, 1-23.

KETTL W., 1994 - *Techniken der Wasser-und Gechiebebe-Wirtschaftung als Beitrag zur Stabilisierung von Ökosyste-*

men, Wildbachverbauung & Ökologie, 58. Jahrgang, Heft, 126: 41-45.

KONDOLF M., 1996 - *A cross section of stream channel restoration*. Journal of Soil and Water conservation, Vol. 51, n. 2, 119-125.

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

REGIONE EMILIA-ROMAGNA, REGIONE DEL VENETO, 1993 - *Manuale tecnico di ingegneria naturalistica*, 237 pp.

SCHWEITZER R., 1995 - *Metodi di ingegneria naturalistica lungo i corsi d'acqua*. In: *Moderni criteri di sistemazione degli alvei fluviali* a cura di Maione U., Brath A., Ed. Bios, Cosenza, 319-326.

UFFICIO FEDERALE DELL'ECONOMIA DELLE ACQUE, 1995 - *Esigenze in materia di protezione contro le piene '95*. Berna, 6 pp.

WOLMAN M. G., 1954 - *A method of sampling coarse river-bed material*. Am. Geophys. Union Trans., 35: 951-956.

SOMMARIO

Le opere di consolidamento dell'alveo realizzate con briglie in massi hanno trovato nell'ultimo decennio una diffusione sempre più ampia in ambito sistematorio. Questa tipologia di briglia viene analizzata, presentandone le caratteristiche costruttive, i campi di impiego e la fattibilità di progettazione secondo criteri geomorfologici. E' quindi riportata una applicazione esemplificativa dell'intervento per un torrente del Trentino Orientale (il Maso di Spinelle), per il quale si è cercato di abbinare l'efficacia del consolidamento d'alveo con l'inserimento delle opere nella morfologia del torrente. A tale scopo sono stati impiegati, in fase di progettazione e di costruzione, alcuni criteri idraulici relativi alle unità morfologiche naturali a gradinata ("step pool"). In occasione di un evento di piena, verificatosi nella fase di ultimazione dei lavori ed avente un tempo di ritorno di 7-10 anni, le briglie in massi così realizzate hanno dimostrato una notevole stabilità ed un funzionamento idraulico soddisfacente.

SUMMARY

During the last ten years the check-dams made of boulders have been fully employed for the torrents management. The analysis of this typology is shown in relation to three aspects: the building features, the field of use, the design according to geomorphologic principles. The "Maso di Spinelle" torrent (Province of Trento) is an example where the check-dams made of boulders join the effectiveness of the bed reinforcing to their morphologic fitting in. The design criterion is taken from the step pool morphology features and seems to be encouraging for further applications. In fact, the works in the Maso di Spinelle torrent have been successfully tested by a quite severe flood event (return period of about 7-10 years).