LINEE GUIDA PER LA PROGETTAZIONE DELLA VIABILITÀ AGRO-SILVO-PASTORALE IN LOMBARDIA

criteri generali

Linee guida per la progettazione della viabilità forestale in Lombardia

Prof. Gian Battista Bischetti
Istituto di Idraulica Agraria dell'Università degli Studi di Milano
Via Celoria, 2 – 20133 Milano

Documento redatto nell'ambito del contratto di ricerca tra Università degli Studi di Milano, Regione Lombardia – D.G. Agricoltura e C.M. della Valsassina, Valvarrone, Val d'Esine e riviera, "*Interazione tra processi idrologici e viabilità forestale nel bacino sperimentale del t. Pioverna orientale (Valsassina) - ipotesi di criteri di progettazione della viabilità forestale*".

Milano, 2005

Si ringraziano tutti i componenti del Gruppo di Lavoro sulla Viabilità Agro-Silvo-Pastorale istituito dalla D.G. Agricoltura della Regione Lombardia per le proficue discussioni ed i preziosissimi suggerimenti:

Dario Curti (Coordinatore) – *Regione Lombardia D.G. Agricoltura*
Simone della Torre – *Regione Lombardia D.G. Agricoltura*
Alessandro Ducoli – *Consorzio Parco Adamello*
Nicola Gallinaro – *Consorzio Forestale Valvestino*
Biagio Piccardi – *ERSAF*
Francesco Radrizzani – *Provincia di Lecco*
Alessandro Sandri – *Regione Lombardia D.G. Agricoltura*
Tommaso Simonato – *Istituto di Idraulica Agraria dell'Università degli Studi di Milano*
G. Pietro Temponi – *C.M. Valle Trompia*
Remo Tottoli
Giulio Zanetti - *C.M. della Valsassina, Valvarrone, Val d'Esine e Riviera*

La viabilità agro-silvo-pastorale rappresenta un fattore strategico per il mantenimento e lo sviluppo socio-economico delle popolazioni residenti nelle aree montane e collinari della regione Lombardia. Per tutelare le attività agro-forestali in questi territori, è necessario ampliare e conservare una diffusa ed efficiente rete viaria che permetta una corretta e moderna gestione agricola e forestale. Bisogna però prendere atto che la realizzazione di nuove strade agro-silvo-pastorali, costruite senza idonee opere di regimazione delle acque superficiali e di contenimento dei versanti, nonché la carente manutenzione della viabilità esistente, costituiscono una delle potenziali cause d'innesco dei fenomeni di dissesto idrogeologico.

La Regione Lombardia, già con la direttiva adottata con deliberazione n. VII/14016 del 8 agosto 2003, ha definito le strade agro-silvo-pastorali suddividendole in classi di transitabilità, anche sulla base delle caratteristiche costruttive (larghezza, pendenza ecc.). Inoltre ha fornito una metodologia per il loro censimento anche in funzione della programmazione degli interventi di manutenzione, ed ha indicato delle soluzioni tecniche-amministrative atte a migliorarne le caratteristiche costruttive, promuoverne la gestione e la regolamentazione del transito.

Con questo manuale la Regione Lombardia intende fornire ai tecnici di tutti gli enti competenti, Comunità Montane, Amministrazioni Provinciali e Comuni, e ai liberi professionisti uno strumento per una corretta progettazione e realizzazione delle strade agro-silvo-pastorali.

Attualmente nella pratica progettuale e realizzativa corrente della viabilità continuano ad essere ripetute una serie di "cattive pratiche". Generalmente i progettisti non sviluppano a sufficienza i progetti che risultano carenti nella raccolta dei dati topografici, geomorfologici, idrologici, idrogeologici. Inoltre non vengono generalmente utilizzate al meglio le informazioni territoriali che la Regione rende disponibili attraverso il suo Sistema Informativo Territoriale. Spesso la limitata disponibilità finanziaria determina la scelta di privilegiare lo sviluppo lineare della strada a discapito della realizzazione delle opere "accessorie" di regimazione delle acque superficiali e di consolidamento delle scarpate, anche se questo può comportare maggiori oneri costruttivi. Mentre queste opere di fatto risultano determinanti nella riduzione dell'impatto ambientale e consentono di limitare gli interventi di manutenzione e quindi i costi di gestione.

In particolare il volume ha come finalità di riassumere le conoscenze e le innovazioni tecniche relative ai rapporti tra la circolazione idrica, la stabilità del pendii e la viabilità agro-silvo-pastorale, cercando di fornire una revisione critica ed un aggiornamento alle tecniche di regimazione delle acque e di consolidamento dei versanti fino ad oggi adottate, anche alla luce delle diverse esigenze connesse all'aumento della fruizione turistico-ricreativa.

Vicepresidente della Regione Lombardia
e Assessore all'Agricoltura
Viviana Beccalossi

INDICE

1 Introduzione 1

2 Processi idrologici di versante 3

2.1 Introduzione 3

2.2 Formazione del deflusso a scala di versante 4

2.3 Formazione del deflusso superficiale in ambito agro-silvo-pastorale 7

3 Interazione tra circolazione idrica e viabilità agro-silvo-pastorale 9

3.1 Premessa 9

3.2 Incremento del deflusso superficiale sul piano viabile e sul versante di valle 9

3.3 Erosione della sede stradale 11

3.4 Aumento del trasporto solido nella rete naturale 12

3.5 Incremento dei picchi di piena 12

3.6 Innesco di franamenti 13

4 Gestione della circolazione idrica sulla VASP ed elementi progettuali 15

4.1 Introduzione 15

4.2 Minimizzazione del dislocamento del deflusso 16

4.3 Elementi progettuali 19

5 Caratteristiche geometriche delle strade agro-silvo-pastorali 20

5.1 Terminologia 20

5.2 Andamento plano-altimetrico 21

5.2.1 Pendenza longitudinale massima 21

5.2.2 Curve e tornanti 22

5.2.3 Diramazioni, dossi e cunette 22

5.3 Sagomatura del piano stradale 23

5.3.1 Piano stradale con pendenza “a monte” 24

5.3.2 Piano stradale con pendenza “a valle” 26

5.3.3 Piani con baulatura 27

5.3.4 Criteri di scelta della tipologia di piano stradale 27

6 Fondo stradale 29

6.1 Introduzione 29

6.2 Schemi semplificati 30

6.3 Interventi di stabilizzazione 31

6.3.1 Geosintetici 31

6.3.2 Inghiaiatura 32

6.3.3 Battuto di cemento 33

6.3.4 Rivestimento in cemento con carrarecce 34

6.3.5 Acciottolati e selciati 34

6.3.6 Leganti 35

6.3.7 Cippato 35

7 Manufatti di sgrondo delle acque superficiali e sottosuperficiali 37

7.1 Introduzione 37

7.2 Opere longitudinali 38

7.2.1 Cunette 39

7.2.2 Drenaggi sottosuperficiali 41

7.2.3 Tombini 42

7.3 Opere trasversali (canalette o deviatori o deflettori) 44

7.3.1 Elementi progettuali 45

7.3.2 Manutenzione 49

7.3.3 Tipologie 50

7.3.4 Scelta della tipologia di opera 57

7.4 Opere di drenaggio in pietrame 59

8 Manufatti per l'attraversamento di corsi d'acqua e impluvi 60

8.1 Introduzione 60

8.2 Dimensionamento degli attraversamenti 61

8.2.1 Normativa 61

8.2.2 Calcolo della portata 62

8.3 Opere 62

8.3.1 Ponti 62

8.3.2 Tombotti 63

8.3.3 Guadi 64

9 Pendenza delle scarpate e opere di stabilizzazione 66

9.1 Introduzione **66**

9.2 Scarpate in roccia **66**

9.3 Scarpate in terreni **67**

9.4 Opere di stabilizzazione **68**

10 Riferimenti bibliografici ***70***

APPENDICE 1- Calcolo della portata nei corsi d'acqua minori ***78***

Introduzione **78**

Attraversamenti stradali **78**

Formula di Talbot 78

Metodi basati sulla sezione "a piene rive" 79

Piccoli bacini **81**

Relazioni empiriche 82

Formula razionale 85

APPENDICE 2 - Classificazione dei terreni USCS (Unified Soil Classification System) ***89***

APPENDICE 3 - Termini della Legenda della Carta Litologica alla scala 1:10.000 (Cartografia Geoambientale, Regione Lombardia) ***90***

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: ciclo idrologico a scala di versante (ridisegnata da Kirkby, 1978)....3
Figura 2: tipologie di deflusso su versante (ridisegnata da Dunne, 1978)....4
Figura 3: zone in cui la saturazione avviene con maggior probabilità....5
Figura 4: componenti dell'idrogramma registrate su versante (modificato da Kirkby, 1978)....5
Figura 5: meccanismi di formazione del deflusso superficiale: a)Hortoniano, b) Dunniano e "di ritorno"....7
Figura 6: dinamica della saturazione in relazione alla formazione dell'idrogramma (da Kirkby, 1978)....8
Figura 7: confronto tra valori della precipitazione di 10 minuti e della conducibilità idraulica satura per diversi usi del suolo nel bacino bacino Sam Mun – Tailandia (da Ziegler e Giambelluca, 1997)....10
Figura 8: erosione incanalata sul piano viabile e sulla scarpata di valle....11
Figura 9: cause di inefficienza dei tombotti in tre stati degli U.S.A. (da Furniss et al., 1998)....14
Figura 10: effetto della diversione di un corso d'acqua (da Furniss et al., 1997 modificata)....15
Figura 11: esempi di utilizzo integrato di opere di drenaggio e piano stradale (modificate da Moll, 1999 e da Gonzales, 1998)....18
Figura 12: terminologia adottata per le strade agro-silvo-pastorali....20
Figura 13: lunghezza e pendenza del percorso del deflusso sul piano viabile....21
Figura 14: esempio di realizzazione di un bivio....23
Figura 15: esempio di raccordo di dossi e avvallamenti (mod. da Wiest, 1998)....23
Figura 16: tipologie di piano stradale....23
Figura 17: il piano conpendenza verso monte consente di gestire con maggior precisione il deflusso che dovesse riversarsi sul piano stradale dal versante di monte o da un impluvio.24
Figura 18: Struttura del solido stradale....29
Figura 19: Sovrastruttura con fondazione e pavimentazione realizzate con il materiale disponibile in sito....30
Figura 20: operazioni di compattazione del fondo stradale (da Bortoli, 2001)....31
Figura 21: Realizzazione di un battuto di cemento (Bortoli, 2001)....33
Figura 22: rivestimento in cemento con carrarecce in mattoni....33
Figura 23: ciottolato a secco....34
Figura 24: selciati realizzati in pietrame e malta con sottofondo armato....34

Figura 25: distribuzione del cippato su una strada negli USA (da Moll, 1999) 36
Figura 26: schema di tombinatura 37
Figura 27: erosione della cunetta laterale (da Copstead e Johansen, 1998) 39
Figura 28: cunetta di monte non rivestita raccordata a canaletta trasversale per lo smaltimento sul versante 40
Figura 29: cunetta rivestita in selciato 41
Figura 30: pozzetti in legname e in massi (Bortoli, 2001) 44
Figura 31: confronto tra la spaziatura dei drenaggi trasversali secondo la metodologia di Copstead et al. (1998) ed i valori proposti da diversi Autori 48
Figura 32: la canaletta deve essere ammorsata in quella di monte per evitare l'aggiramento 48
Figura 33: orientamento e protezione delle canalette superficiali (da Copstead et al., 1998) 49
Figura 34: manutenzione di una canaletta negli USA (da Copstead et al., 1998) 50
Figura 35: esempi di canalette in legname (ridisegnate da Copstead et al., 1998 e Bortoli, 1982) 51
Figura 36: canalette in metallo (Ridisegnate da Bortoli, 1982 e da Copstead et al., 1998) 52
Figura 37: canalette in tronchetti (da Bortoli, 2001 e Copstead et al., 1998) 52
Figura 38:canaletta mista legname e malta cementizia (Eterovich, 2003) 53
Figura 39: canaletta prefabbricata in calcestruzzo ad incastro (a) e con griglia in tronchetti (b) (da Bortoli, 1982, 2001) 54
Figura 40: canaletta prefabbricata in calcestruzzo con travetto (da Bortoli, 1982) 54
Figura 41: canaletta a cordamolla (da Bortoli, 1982) 55
Figura 42: caratteristiche di un avallamento (dip) (da Copstead et al., 1998) 55
Figura 43: avvallamento in terra (da USDA, 1998) 56
Figura 44: dosso realizzato con tondame 56
Figura 45: deflettori in gomma (da Gonzales, 1998) 58
Figura 46: tratto di strada in zona di affioramento di deflusso sottosuperficiale realizzato in pietrame a secco (da Moll, 1999) 59
Figura 47: campata di un ponticello su strada agro-silvo-pastorale intasato da materiale legnoso 62
Figura 48: la sagomatura del piano stradale in corrispondenza di un tombotto consente di evitare diversioni (da Furniss et al.,1997) 63
Figura 49: metodi per ridurre il rischio d'intasamento dei tombotti (da Furniss et al., 1998) 65
Figura 50: guado in pietrame e malta e pietrame con platea e muri in calcestruzzo 65

Figura 51: curva di invilupo dei massimi valori di portata in relazione all'area contribuente 82
Figura 52: parameri W e α del metodo di Cook 84

INDICE DELLE TABELLE

Tabella I: valori della conducibilità idraulica a saturazione (K_s) per alcuni suoli e coperture (da Dunne, 1978).....6
Tabella II: valori di conducibilità idraulica satura e densità apparente nel bacino Sam Mun – Tailandia (da Ziegler e Giambelluca, 1997) 10
Tabella III: caratteristiche delle diverse tipologie di piano stradale (da Moll et al., 1997 modificata) 28
Tabella IV: confronto tra canalette e tombinature (da Johansen et al., 1997 modificata) 38
Tabella V: spaziatura dei drenaggi trasversali (Hafner, 1971, cit. Mazzalai, 1987).....46
Tabella VI: valori di spaziatura (m) per strade con fondo naturale pubblicati negli USA (da Copstead et al., 1998).....47
Tabella VII: massima distanza[a] tra opere trasversali basata sui gruppi di erodibilità dei suoli del USCS[b] (da Copstead et al., 1998).....47
Tabella VIII: Valori medi delle pendenze di scarpate in roccia.....67
Tabella IX: Linee guida per la pendenza delle scarpate di scavo e di riporto (modificato da British Columbia Forest Code, 1995) 68
Tabella X: Proprietà fisico-meccaniche e indicazioni a scopo ingegneristico dei terreni (da: Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78-1989, modificato).....69
Tabella XI: valori diametro di progetto (m) dei tombotti in funzione della larghezza e dell'altezza della sezione "a piene rive" (da Washington State Departement of Natural Resources).....81
Tabella XII: valori del parametro W nel metodo di Cook 84
Tabella XIII:Coefficienti di deflusso suggeriti dal PAI (raccomandati da Handbook of Applied Hydrology, Ven Te Chow, 1964).....87
Tabella XIV: valori del coefficiente C in funzione delle caratteristiche del bacino (da Benini, 1990) 87
Tabella XV: valori dei parametri delle L.S.P.P. contenuti nel PAI per le stazioni della Lombardia 88

1 INTRODUZIONE

La viabilità agro-silvo-pastorale (VASP) può essere definita come l'insieme delle strade a servizio dei fondi agricoli, dei pascoli, degli alpeggi e dei boschi in ambito montano e collinare; sebbene non trovi specifico riscontro nel nome, inoltre, vi è anche una sempre più rilevante funzione turistico-ricreativa.

Questa definizione trova riscontro nella recente normativa della Regione Lombardia (D.G.R. 7/14016 del 8 agosto 2003 "Direttiva relativa alla viabilità locale di servizio all'attività agro-silvo-pastorale").

In Lombardia, così come in molte altre Regioni italiane, buona parte della rete VASP è costituita, di fatto, da quelle strade che erano tradizionalmente definite forestali e che oggi assumono una funzione più complessa e differenziata. Questo tipo di viabilità, infatti, fino a pochi anni or sono era essenzialmente un'infrastruttura a servizio delle operazioni di esbosco e le sue caratteristiche si basavano principalmente su criteri legati alla pianificazione forestale ed alla percorribilità da parte dei mezzi (Bortoli, 1982; Pozzatti e Cerato, 1984; Mazzalai, 1982). Negli ultimi anni in relazione al ridursi del valore di macchiatico ed alle accresciute esigenze ambientali e ricreative, la viabilità forestale è andata via via assumendo una connotazione di *infrastruttura polifunzionale ad utilizzo integrato* (Marchi e Spinelli, 1997; FAO, 1998): produttivo (esbosco, collegamento con unità produttive agro-silvo-pastorali poco accessibili), antincendio (sia per l'accesso ai mezzi, che con funzione tagliafuoco), ricreativo (maggior accessibilità pedonale e cicloturistica), ecc.

Questo nuovo contesto, oltre ad una revisione del significato complessivo della viabilità forestale, richiede anche criteri di pianificazione, di progettazione e di realizzazione nuovi e più numerosi e diversificati rispetto al passato. In particolare, a tutti i livelli occorre considerare con maggiore attenzione tutti i possibili impatti che l'infrastruttura viaria può determinare su di un ambiente particolarmente vulnerabile, quale è quello montano. Gli impatti sono numerosi e diversi, i principali riguardano la distruzione diretta di biotopi o microbiotopi con particolare riferimento alle zone umide (Hinterstoirsser, 1990b), il peggioramento delle condizioni della vegetazione e degli animali che vengono influenzati dal transito dei mezzi (sia motorizzati che non motorizzati, quali mountain bike, cavalli, ecc.) e dalla maggior pressione antropica (Elgmork, 1978; Hinterstoisser, 1990a, 1990b), l'alterazione del paesaggio stesso che può essere deturpato dai manufatti legati alla realizzazione dell'infrastruttura (Gardner, 1979), la

predisposizione ai fenomeni di dissesto idrogeologico innescati dall'alterazione del regime dei deflussi idrici.

Tra i diversi impatti sopra menzionati, si può sicuramente affermare che nella maggior parte dei casi tra i principali vi sono da ascrivere, direttamente o indirettamente, all'alterazione della naturale circolazione idrica dei versanti interessati dalla viabilità e della rete idrografica che vi sottende (si veda ad esempio Marchi e Spinelli, 1997). Tale alterazione, infatti, ha come conseguenza l'innesco di erosioni superficiali e di fenomeni di dissesto, sia alla scala di segmento stradale (necessità di manutenzioni ordinarie e straordinarie, sicurezza del transito, ecc.), che a quella di versante e di bacino (franamenti, aumento dei colmi di piena, peggioramento della qualità delle acque, sedimentazione del materiale solido negli alvei e nei bacini artificiali, ecc.); i dissesti, inoltre, peggiorando l'ambiente fisico hanno conseguenze negative sulla vegetazione e sulla fauna (soprattutto dell'ambiente acquatico per il maggior trasporto solido).

Nonostante questi effetti siano largamente riconosciuti in linea di principio, nella pratica progettuale e realizzativa della viabilità agro-silvo-pastorale continuano a prevalere vincoli dovuti alla carenza nelle informazioni di base, criteri legati alle prassi consolidate ed il principio di economicità delle infrastrutture, con la conseguenza che in genere non si presta una sufficiente attenzione alla gestione della circolazione idrica.

Il presente contributo si pone l'obiettivo di riassumere le conoscenze relative ai rapporti tra circolazione idrica e viabilità agro-silvo-pastorale ed i relativi impatti e di fornire elementi utili per una sua corretta progettazione e realizzazione. Non saranno invece trattati gli aspetti legati alla programmazione, alla pianificazione, all'utilizzo integrato ed alla valutazione di impatto ambientale delle infrastrutture che, pur rivestendo un ruolo cruciale, competono al livello della pianificazione territoriale che non rientra negli obiettivi del lavoro.

Per quanto riguarda la struttura del documento, esso può essere idealmente diviso in due parti: la prima è di carattere prevalentemente metodologico e richiama i principi del movimento dell'acqua sui versanti e gli impatti esercitati dalla presenza di una strada sulla circolazione idrica; la seconda è invece di carattere applicativo e tratta gli elementi progettuali e realizzativi delle strade agro-silvo-pastorali che permettono di governare la circolazione idrica e di prevenire fenomeni di dissesto: pendenza e tipologia di piano viario, pendenza delle scarpate, manufatti di sgrondo delle acque meteoriche, manufatti di attraversamento dei corsi d'acqua, ecc.

Al volume generale seguiranno due approfondimenti specifici sulla stabilità delle scarpate e sul dimensionamento degli attraversamenti degli impluvi.

2 PROCESSI IDROLOGICI DI VERSANTE

2.1 Introduzione

Al fine di comprendere gli impatti che la viabilità agro-silvo-pastorale esercita sui versanti che vengono attraversati e più in generale sull'intero bacino idrografico, occorre richiamare brevemente le componenti del ciclo idrologico ed i processi che governano la produzione del deflusso in ambito montano. In generale, com'è noto, il ciclo idrologico rappresenta l'insieme dei processi di circolazione dell'acqua in tutte le sue possibili fasi (liquida, solida, gassosa). A scala di versante (Figura 1) le precipitazioni giungono in forma liquida o solida sulla superficie terrestre, dove vengono intercettate dalla copertura vegetale; una parte dell'acqua intercettata viene trattenuta e successivamente evaporata, mentre un'altra raggiunge comunque il suolo dove può infiltrarsi nel terreno, oppure, dopo aver riempito le depressioni superficiali, scorrere sulla sua superficie e raggiungere la rete idrografica. La precipitazione solida, permane sulla

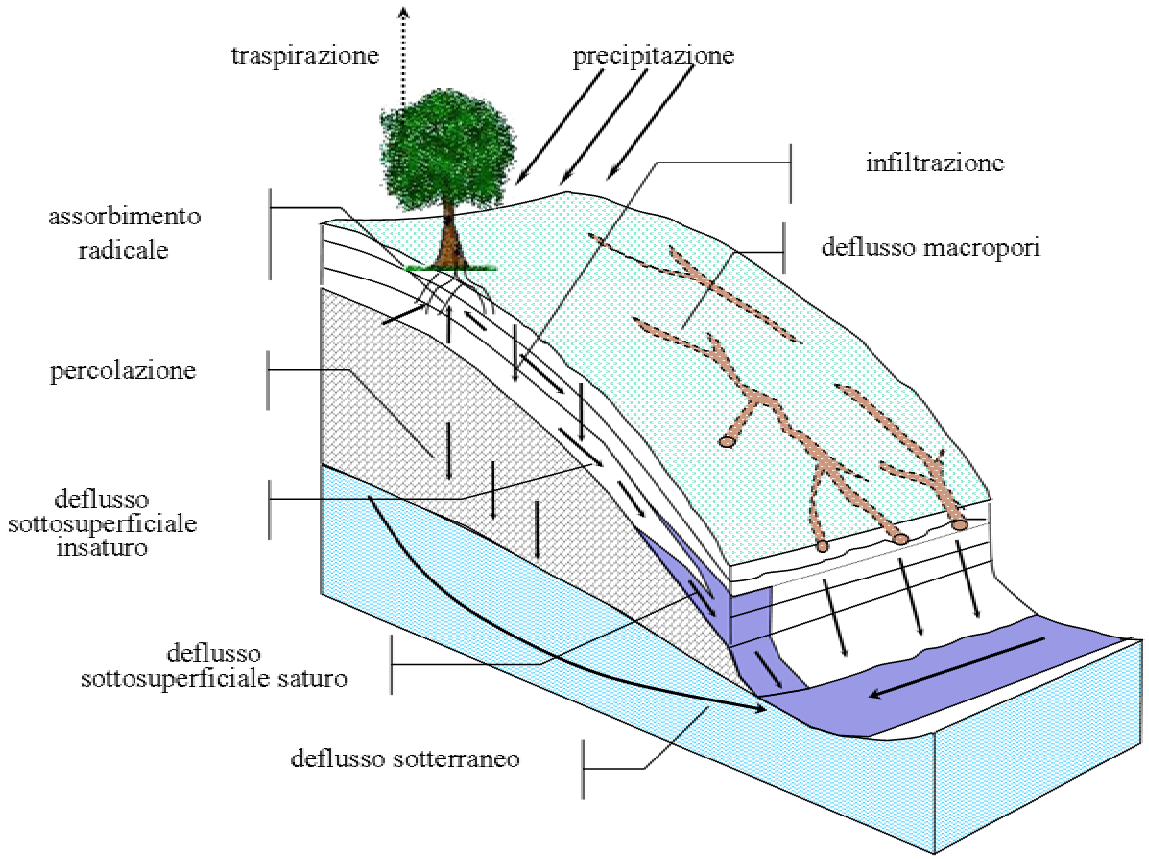


Figura 1: ciclo idrologico a scala di versante (ridisegnata da Kirkby, 1978)

superficie del suolo per un tempo più o meno lungo in funzione delle caratteristiche termiche locali, dopodiché si scioglie infiltrandosi o scorrendo in superficie.

L'acqua infiltrata può muoversi verticalmente fino a raggiungere gli strati profondi oppure, se le caratteristiche del suolo lo consentono, può scorrere all'interno della matrice porosa verso valle nello strato immediatamente sotto la superficie e raggiungere, in tempi più o meno lunghi, il piede del versante e la rete idrografica; all'interno del suolo l'acqua può anche muoversi a superficie libera o addirittura in pressione attraverso una rete di canalicoli costituiti dai macropori.

L'acqua all'interno del suolo, infine, può ritornare nell'atmosfera attraverso i processi evapotraspirativi dopo essere stata assorbita dalla vegetazione; anche l'acqua immagazzinata nelle masse liquide superficiali può tornare nell'atmosfera attraverso i processi evaporativi, così come l'acqua intercettata dalla vegetazione.

2.2 Formazione del deflusso a scala di versante

Concentrando l'attenzione sui processi di formazione del deflusso alla scala di versante, si possono distinguere diverse tipologie di deflusso (Figura 3):

- DEFLUSSO SUPERFICIALE, dato dalla porzione di precipitazione che raggiunto il suolo non s'infiltra né viene ritenuta nelle depressioni superficiali, e che scorre sulla superficie del terreno verso la rete di drenaggio. Questo tipo di deflusso ha una rilevanza in termini di erosione superficiale e di entità dei colmi di piena nella rete idrografica; la velocità con cui l'acqua scorre sulla superficie del terreno, infatti, produce sforzi che sono in grado di distaccare e trasportare le particelle di suolo, e riduce i tempi di arrivo alla rete provocando una risposta idrologica rapida ed intensa. Dunne (1978) indica per il deflusso superficiale velocità variabili tra 10 e 500 m/h in funzione della pendenza e della scabrezza, cui consegue nel caso esemplificativo di un versante lungo

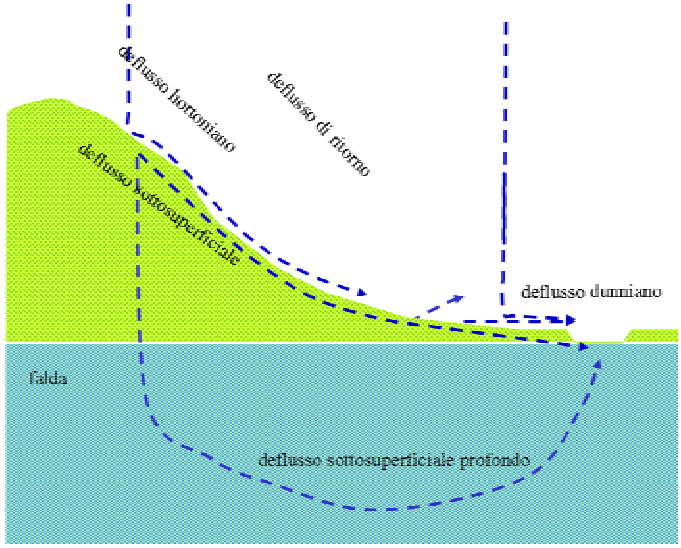


Figura 2: tipologie di deflusso su versante (ridisegnata da Dunne, 1978)

100 m, un tempo massimo di permanenza di una particella d'acqua variabile tra 12 minuti e 10 ore.

- DEFLUSSO SOTTOSUPERFICIALE, dato dalla porzione di precipitazione che, raggiunto il suolo ed infiltratasi, defluisce verso valle movendosi nello strato più superficiale del suolo; tale movimento può avvenire in termini di flusso in mezzo poroso e/o di deflusso concentrato nella rete dei macropori che si formano nel suolo a causa delle eterogeneità ed all'attività biotica (animali, radici, ecc.). Il deflusso sottosuperficiale può alimentare direttamente la rete idrografica o riaffiorare in superficie originando deflusso superficiale (detto "di ritorno"); in ogni caso tende a contribuire alla saturazione del suolo nelle zone di fondovalle e/o di concavità, o in concomitanza di variazioni delle caratteristiche idrauliche del suolo e/o di riduzioni del suo spessore (Figura 3).

Nei bacini vegetati caratterizzati da suolo sviluppato e clima umido, la velocità con cui la precipitazione può infiltrarsi nel terreno è così elevata (Tabella I) che il deflusso sottosuperficiale rappresenta la modalità principale con cui l'acqua raggiunge la rete idrografica, caratterizzandone l'idrogramma di piena (Loudermilk, 1934; Hursh, 1936;

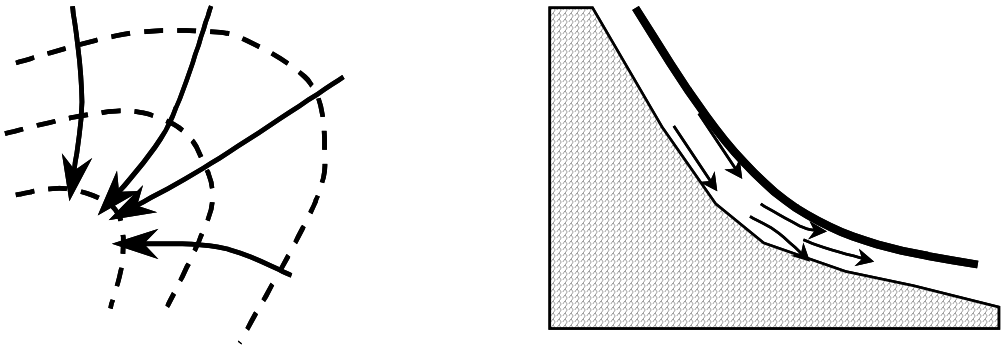


Figura 3: zone in cui la saturazione avviene con maggior probabilità

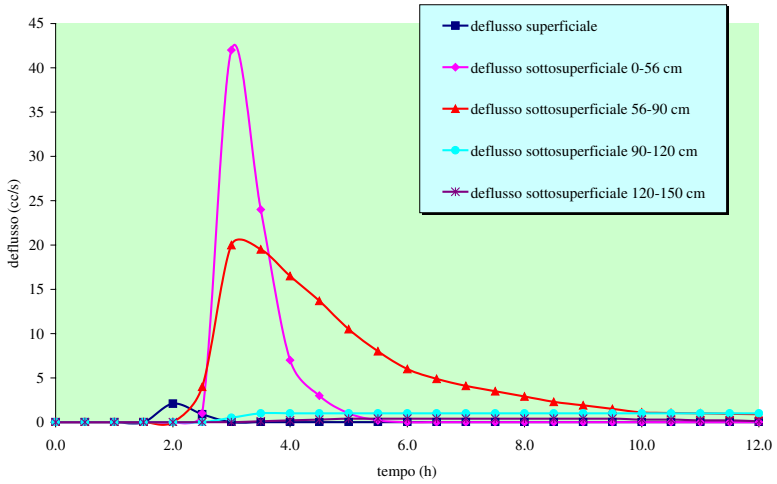


Figura 4: componenti dell'idrogramma registrate su versante (modificato da Kirkby, 1978)

Whipkey, 1965; Hewlett e Hibbert, 1967; Montgomery et al., 1997; Figura 4);

- DEFLUSSO SOTTERRANEO, dato dal deflusso che avviene negli strati profondi del terreno che sono alimentati dalla percolazione e dai movimenti laterali della falda; a causa delle velocità molto basse, in genere, nei piccoli bacini non contribuisce agli idrogrammi di piena (Likens et al., 1977; Mulholland, 1993), ma è fondamentale nel determinare il deflusso di base e la perennità della portata (Montgomery et al., 1997).

Tabella I: valori della conducibilità idraulica a saturazione (K_s) per alcuni suoli e coperture (da Dunne, 1978)

Regione	Tipo di suolo	copertura	K_s (mm/h)	Fonte
Suoli forestali				
Vermont (USA)	franco sabbioso e franco limoso	Pascolo (in precedenza bosco di pino)	>80.0	Dunne (1969)
Vermont (USA)	franco sabbioso con orizzonte ghiacciato	Pascolo (in precedenza bosco di pino)	0.2	Dunne (1969)
Ohio (USA)	franco sabbioso e franco limoso	Bosco d'alto fusto	>76	Whipkey (1969)
Sudbury, Ontario (Canada)	limo sabbioso soggetti ad erosione	Suolo nudo	2	Pearce (1973)
Suoli a pascolo				
Colorado (USA)	Suoli sviluppati su argillliti	pascolo	Secco 16-22 Umido 14-21	Lusby et al. (1963)
	Suoli sviluppati su argillliti	Pascoli non attivi	Secco 16-20 Umido 14-19	Lusby et al. (1963)
	Suoli sviluppati su arenaria	pascolo	Secco 47-52 Umido 31-33	Lusby et al. (1963)
	Suoli sviluppati su arenaria	Pascolo non attivo	Secco 64-84 Umido 42-55	Lusby et al. (1963)
Arizona/New Mexico (USA)	sabbie ghiaiose e e suoli franco ghiaiosi	Prato e arbusti	13-43	Kincaid et al. (1966)
	franco sabbioso (topsoil)		342-372	Dunne (1969)
	franco sabbioso		305	Hewlett e Hibbert (1963)
	franco sabbioso (56-90 cm)		286	Whipkey (1965)
	franco limoso e franco		1.5-165 (media 84-104)	Rawitz et al. (1970)
	limo sabbioso di origine lacustre (subsoil)		48	Dunne (1969)
	franco argilloso (topsoil)		25-75	Betson et al. (1968)
	franco argilloso (subsoil)		7.5	Betson et al. (1968)
	franco (90-120 cm)		17	Whipkey (1965)
	franco argilloso (120-150 cm)		2	Whipkey (1965)

2.3 Formazione del deflusso superficiale in ambito agro-silvo-pastorale

Nei climi umidi caratterizzati dalla presenza di vegetazione e di suolo la dinamica della circolazione idrica sui versanti e nei piccoli bacini, e di conseguenza gli impatti che la viabilità può esercitare, è dominata dalla relazione tra deflusso sottosuperficiale e deflusso superficiale.

Il deflusso superficiale, che si origina quando l'intensità della precipitazione supera la velocità di infiltrazione nel suolo, può avvenire secondo tre meccanismi: hortoniano, dunniano e "di ritorno".

Il deflusso di tipo hortoniano (Figura 5a) si origina quando la velocità d'infiltrazione è molto bassa anche quando il terreno non è saturo ed è superata dall'intensità della pioggia (Horton, 1933); si osserva prevalentemente in ambienti aridi caratterizzati da precipitazioni intense, suolo sottile e poco permeabile. Negli ambienti montani e pedemontani dei climi umidi questo tipo di deflusso è tipico delle aree prive di vegetazione con substrato compatto e ridotta capacità d'infiltrazione (strade, aree di frana, terreno ghiacciato, ecc.).

Il deflusso di tipo dunniano si origina quando la pioggia cade su di una porzione di versante saturata in precedenza (o durante la precipitazione stessa) a seguito dell'infiltrazione o del deflusso sottosuperficiale che perviene da monte, con una intensità maggiore della conducibilità idraulica a saturazione (Hewlett e Hibbert, 1967; Dunne e Black, 1970; Figura 5b).

La saturazione del suolo ad opera del deflusso sottosuperficiale, come precedentemente illustrato, si osserva più facilmente in alcune zone del bacino dove tale tipo di deflusso tende a concentrarsi o a ridurre la velocità a causa di brusche riduzioni di pendenza, di spessore del suolo o di trasmissività (Figura 3). Tali zone si trovano generalmente al piede dei versanti e nelle zone di concavità, per cui il deflusso di tipo dunniano, non si osserva in maniera uniforme nello spazio, ma è frequentemente localizzato in prossimità degli impluvi; la formazione

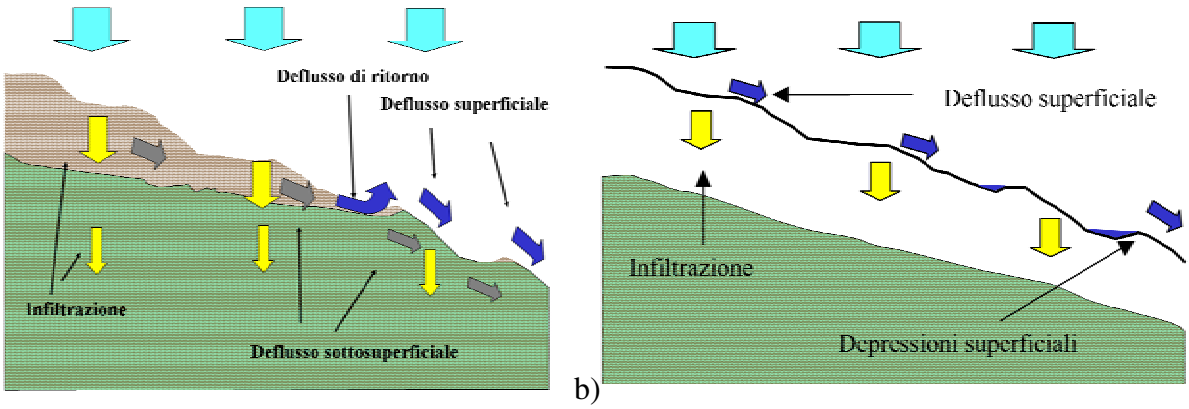


Figura 5: meccanismi di formazione del deflusso superficiale: a)Hortoniano, b) Dunniano e "di ritorno"

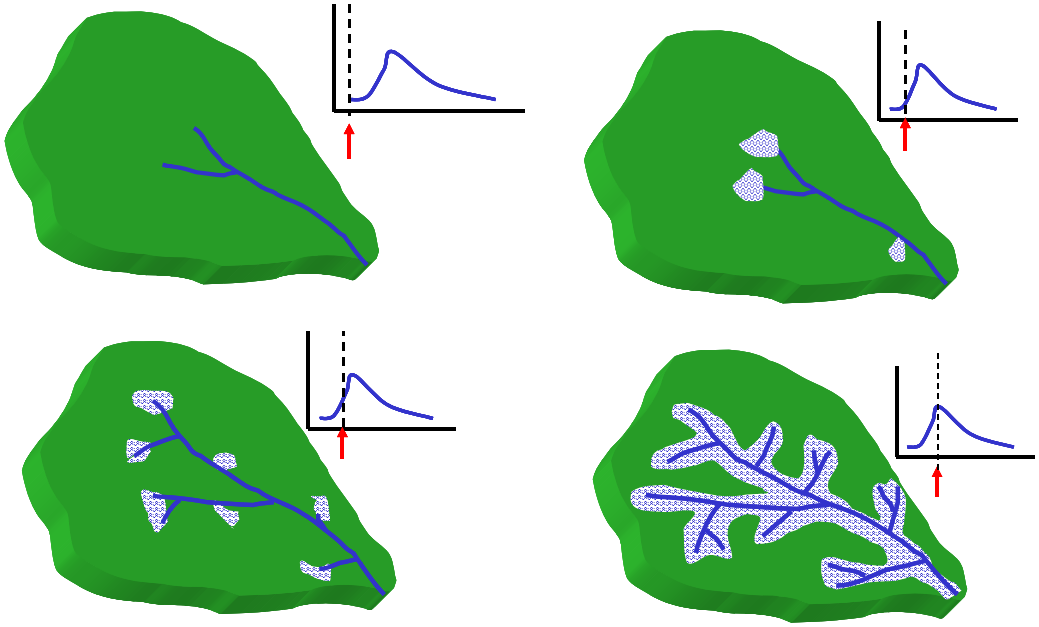


Figura 6: dinamica della saturazione in relazione alla formazione dell'idrogramma (da Kirkby, 1978)

dell'idrogramma di piena, di conseguenza, è dominata dalla dinamica della saturazione del suolo (Figura 6).

Il deflusso "di ritorno" si origina quando il deflusso sottosuperficiale riemerge sulla superficie del suolo (Dunne e Black, 1970). Tale fenomeno può avvenire, come per il deflusso di tipo dunniano, con diverse modalità: a causa della riduzione di spessore dello strato permeabile, a causa di una convergenza del flusso che ne determina l'incremento di altezza, o a causa di una riduzione di velocità del deflusso conseguente ad una variazione di permeabilità del suolo. Questo tipo di deflusso, di conseguenza, si osserva in corrispondenza di eterogeneità del suolo o di concavità della superficie.

Riassumendo, l'effettiva modalità con cui il deflusso si forma è variabile e dipende da diversi fattori (Montgomery et al., 1997): precipitazioni particolarmente intense tenderanno a produrre deflusso di tipo hortoniano nei punti in cui la velocità d'infiltrazione è minore; nelle zone in cui tende ad accumularsi il deflusso, avremo invece più facilmente deflusso di tipo dunniano e di ritorno; nelle zone in cui, invece, si hanno elevati valori di permeabilità del substrato, il deflusso sarà governato dal movimento sotterraneo; quando i precedenti tipi di deflusso sono ridotti, infine, la modalità principale sarà quella del deflusso sottosuperficiale.

3 INTERAZIONE TRA CIRCOLAZIONE IDRICA E VIABILITÀ AGRO-SILVO-PASTORALE

3.1 Premessa

Un versante attraversato da una strada agro-silvo-pastorale subisce una serie di alterazioni che sono innanzi tutto a carico della morfologia e secondariamente a carico delle caratteristiche idrologiche del substrato. Con la costruzione di una strada, infatti, si ha:

- l'esbosco di una fascia di alcuni metri con conseguente eliminazione della copertura vegetale e della lettiera;
- lo scavo ed il conseguente "taglio" del versante che può determinare l'affioramento del deflusso sottosuperficiale;
- la creazione di scarpate a maggiore pendenza e minor grado di stabilità rispetto al versante naturale;
- la sostituzione di un terreno con caratteristiche di elevata capacità di infiltrazione, quale è in genere quello forestale, con un substrato molto compatto e quasi impermeabile.

Queste alterazioni provocano una modificazione della circolazione idrica che, oltre ad avere importanti conseguenze in termini di impatti a scala di versante e di bacino (concentrazione del deflusso in alcuni punti e possibile innesco di fenomeni di dissesto, incremento di portata liquida e solida nella rete di drenaggio, ecc.), può alterare la geometria originaria e peggiorare le condizioni di transitabilità ai mezzi (erosione superficiale sulla sede stradale, cedimenti della scarpata di valle, smottamenti dalla scarpata di monte, ecc.).

Nel presente capitolo vengono analizzati gli impatti di tipo idrogeologico che una strada può esercitare, sia a livello locale che di bacino.

3.2 Incremento del deflusso superficiale sul piano viabile e sul versante di valle

La rimozione della fascia di vegetazione necessaria per la realizzazione della strada ha come prima conseguenza una minore intercettazione della precipitazione, con conseguente maggior volume d'acqua che raggiunge il terreno; un terreno che per l'intera larghezza della sede stradale, e frequentemente anche sulle scarpate di monte e di valle, risulta completamente alterato nelle sue caratteristiche idrologiche. In particolare, la realizzazione della sede viaria e la compattazione necessaria a consentire la transitabilità ai mezzi, comporta una drastica riduzione della capacità d'infiltrazione del substrato (Ziegler e Giambelluca, 1997; Crook et al., 1999;

Tabella II: valori di conducibilità idraulica satura e densità apparente nel bacino Sam Mun – Tailandia (da Ziegler e Giambelluca, 1997)

Utilizzo del suolo	Foresta	Agricolo	Margine strada	Piano stradale
# campioni	11	22	8	18
Conducibilità idraulica satura (mm/h)				
mediana	146.1	82.8	8.0	2.3
media	523.9	104.8	14.3	2.3
Dev. St.	601.6	87.4	14.6	1.2
Densità apparente (t/m^3)				
mediana	0.89	1.02	1.36	1.41
media	0.92	1.04	1.36	1.39
Dev. St.	0.10	0.14	0.09	0.10

Tabella II), con conseguente aumento del deflusso superficiale. A ciò si aggiunge, nel caso di strade in trincea o a mezza costa, la possibilità che una consistente quota di deflusso sottosuperficiale venga alla luce concentrandosi poi sulla sede stradale (Harr et al., 1975; King e Tennyson, 1984; Wright, 1990).

L'incremento del deflusso superficiale è sicuramente uno degli effetti più rilevanti della costruzione di una strada agro-silvo-pastorale e deve essere accuratamente gestito al fine di evitare molteplici effetti negativi, quali l'erosione del piano viabile (che ne riduce la transitabilità), l'aumento del picco di piena nella rete idrografica (che può creare situazioni di rischio idraulico), le erosioni ed i franamenti delle scarpate (che costituiscono una fonte di rischio idrogeologico e peggiorano l'habitat acquatico), descritti in maggior dettaglio nei paragrafi seguenti. La conseguenza di una ridotta capacità d'infiltrazione, va vista anche in termini di una maggior frequenza con cui si produce deflusso superficiale; Ziegler e Giambelluca (1997) hanno calcolato che piogge della durata di 10 minuti non

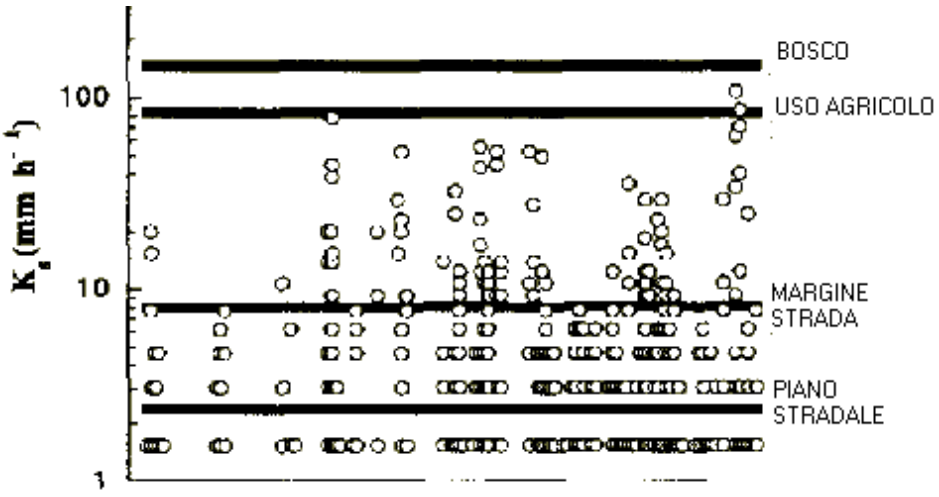


Figura 7: confronto tra valori della precipitazione di 10 minuti e della conducibilità idraulica satura per diversi usi del suolo nel bacino bacino Sam Mun – Tailandia (da Ziegler e Giambelluca, 1997)

superano mai il valore di conducibilità idraulica satura su versante coperto da foresta, mentre lo superano sempre su strada (Figura 7).

3.3 Erosione della sede stradale

La diminuita capacità d'intercettazione della vegetazione (minor effetto di riduzione dell'energia cinetica delle gocce) e l'aumento del deflusso superficiale (aumento della tensione esercitata), determinano una maggiore erosività delle piogge. L'erosione di tipo diffuso che ne consegue, evolve rapidamente verso un'erosione di tipo incanalato in grado di scavare fossi profondi anche decine di centimetri, riducendo la transitabilità ai mezzi fino a compromettere la stabilità della strada. La tendenza del deflusso a concentrarsi in percorsi preferenziali è spesso favorita, se non innescata, dalle tracce lasciate dal passaggio dei mezzi, soprattutto quando la sede stradale è umida (Figura 8).

L'entità del fenomeno dipende da numerosi fattori:

- intensità delle precipitazioni (energia cinetica delle gocce ed entità del deflusso superficiale di tipo Hortoniano – cfr. § 2.3);
- caratteristiche del materiale che costituisce il piano viabile (capacità d'infiltrazione);
- età della strada (l'erosione è massima durante la costruzione e nei primi anni d'esercizio - Megahan e Kidd 1972; Swift 1985, Swift 1988, Thompson et al. 1996, Vowell 1985);

Figura 8: erosione incanalata sul piano viabile e sulla scarpata di valle

- intensità del traffico (Reid e Dunne 1984, Sullivan e Duncan 1981) e tipologia di mezzi che vi transitano;
- pendenza longitudinale;
- lunghezza del percorso dell'acqua (nel caso di deflusso di tipo Hortoniano la portata, e quindi l'erosività, aumenta proporzionalmente con la lunghezza del tratto considerato).

3.4 Aumento del trasporto solido nella rete naturale

L'erosione del piano viabile, oltre al peggioramento della sede stradale, comporta un aumento della quantità di materiale solido che perviene alla rete di drenaggio naturale, ed il conseguente peggioramento qualitativo del corpo idrico stesso (si veda Gucinski et al., 2000, per i numerosi riferimenti a studi sull'argomento). Tale effetto dipende, oltre che dall'entità dell'erosione, dalla distanza della strada dal corpo idrico e dalle caratteristiche della parte di versante che vi si frappone: tanto minore è la distanza, maggiore è la pendenza e scarsa è la vegetazione, tanto maggiore sarà la quantità di materiale che raggiunge la rete; al contrario, distanze maggiori, pendenze modeste e presenza di vegetazione aumentano la quantità di materiale che si rideposita a valle della strada e che non raggiunge la rete idrografica.

Nella scelta del tracciato, è quindi sempre buona norma ridurre il più possibile il contatto tra strada e corsi d'acqua ed in ogni caso prevedere una zona cuscinetto vegetata ("buffer zone").

Un notevole contributo al trasporto solido in rete è dato anche dai franamenti che si possono verificare con la presenza della strada e che verranno trattati nel prosieguo (cfr § 3.6).

3.5 Incremento dei picchi di piena

La maggiore produzione di deflusso superficiale e l'affioramento di una consistente quota di deflusso sottosuperficiale (Swanson e Wemple, 1998) comporta il recapito alla rete di drenaggio di un consistente volume d'acqua in tempi più rapidi di quanto avverrebbe naturalmente. Il deflusso intercettato con l'apertura della scarpata di monte, infatti, dopo essere transitato sulla sede stradale (caratterizzata tra l'altro da una minor scabrezza rispetto al versante), viene convogliato direttamente verso la rete di drenaggio; in tale modo si ha una concentrazione del deflusso che comporta un anticipo e un innalzamento dei picchi degli idrogrammi di piena, con un aumento del rischio idraulico nelle sezioni di valle. Tale comportamento è stato verificato da diversi studi (Harr et al., 1975; King e Tennyson, 1984; Wemple et al. 1996a; Jones e Grant 1996; Thomas e Megahan, 1998), mentre altri non hanno evidenziato influenze significative (Rothacher, 1965; Ziemer, 1981; Wright et al., 1990). In effetti, tale influenza è particolarmente evidente in occasione di eventi poco intensi, mentre diviene poco rilevante in occasione di eventi

di piena significativi; Ziegler e Giambelluca (1997) hanno calcolato per eventi di 60 minuti che il contributo del deflusso prodotto su strada è pari al 21% in occasione di eventi con tempo di ritorno di 2 anni ed è solamente del 5% in occasione di eventi con tempo di ritorno pari a 12 anni.

Al pari di quanto osservato precedentemente per la riduzione della capacità d'infiltrazione, l'effetto più significativo è quindi quello di aumentare la frequenza degli eventi intensi, trasformando in eventi critici quelli che normalmente non lo sarebbero.

Occorre comunque precisare che non tutti i segmenti di strada si comportano allo stesso modo, recenti studi (Wemple et al., 1996b; Bowling e Lettenmeier, 1997) hanno infatti dimostrato che la quantità di deflusso prodotto da ciascun segmento dipende in modo significativo dalla quota di deflusso sottosuperficiale intercettato e riportato in superficie. La posizione del segmento stradale rispetto al versante (al piede, a metà o a monte), pertanto, può influenzare notevolmente la quantità di deflusso prodotto e convogliato verso la rete.

3.6 Innesco di franamenti

Diversi Autori in diverse aree del mondo (McCashion e Rice, 1983; Meghan, 1984; Rood, 1984; Amaranthus et al., 1985; Sidle, 1985; McClelland et al., 1999), hanno dimostrato che la presenza di strade negli ambienti agro-silvo-pastorali è una causa importante per l'innesco di fenomeni di franamento superficiale; secondo Gucinski et al. (2000) tra frane in ambito forestale in presenza e in assenza di strade vi sarebbe un rapporto variabile tra 30 e 300.

In genere, le frane associate alle strade agro-silvo-pastorali sono fenomeni di tipo superficiale che mobilitano piccole quantità di materiale, ma che a causa del loro numero (McClelland et al., 1999) possono costituire un grosso problema di sicurezza della strada e un notevole onere in termini di manutenzione. La movimentazione diffusa di materiale solido, inoltre, può intasare gli impluvi predisponendo le condizioni per l'innesco di colate detritiche. È inoltre interessante notare che la presenza di strade sembra essere una causa di dissesto particolarmente rilevante nei territori caratterizzati da basse pendenze, dove in condizioni naturali non si avrebbero fenomeni di dissesto (McClelland et al., 1999; Jakob, 2000).

Le cause dei franamenti in presenza di una strada sono dovuti sostanzialmente a due ordini di fattori:

- la creazione di scarpate con minor stabilità rispetto al versante naturale a causa della maggiore pendenza e per le scarpate di valle del peggioramento delle caratteristiche geotecniche del terreno (poco compatto con forte presenza di materiale organico);

- l'inadeguatezza e soprattutto l'inefficienza dei manufatti idraulici (Donald et al., 1996; Furniss et al., 1997) fa sì che il deflusso si riversi dapprima sulla sede stradale e poi sulla scarpata di valle, determinandone l'erosione o la saturazione. A tale proposito si ritiene utile sottolineare che l'inefficienza dei manufatti non è da imputarsi ad un'insufficienza di tipo idraulico quanto il loro intasamento con materiale detritico e legnoso (Figura 9).

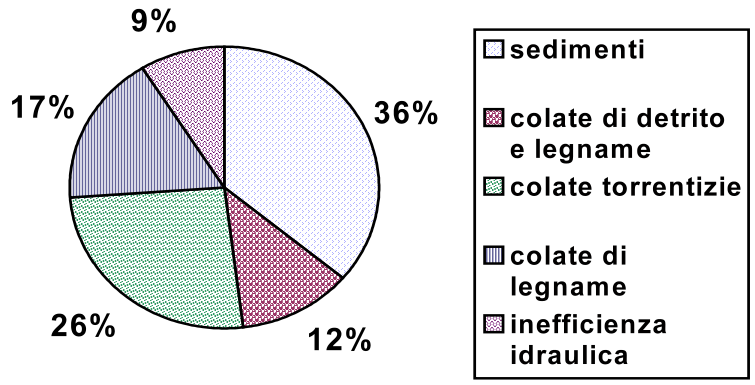


Figura 9: cause di inefficienza dei tombotti in tre stati degli U.S.A. (da Furniss et al., 1998)

4 GESTIONE DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SULLA VASP ED ELEMENTI PROGETTUALI

4.1 Introduzione

Nei precedenti capitoli si è visto che gli impatti esercitati sull'ambiente fisico riguardano principalmente gli aspetti legati all'idrologia ed alla geomorfologia, sia alla scala locale del singolo segmento stradale, che alla scala di bacino.

In particolare, si è visto che l'effetto principale della presenza di una strada su di un versante consiste nell'**intercettare** direttamente la precipitazione ed il deflusso sottosuperficiale, nel **concentrare** tale deflusso sul piano viabile o in canalette e cunette adiacenti la strada ed in generale nel **deviare** il naturale percorso dell'acqua sui versanti.

Numerose esperienze, inoltre, hanno evidenziato che una deviazione del deflusso inalveato al di fuori del suo naturale percorso (ad esempio a causa dell'inefficienza del manufatto realizzato per il suo attraversamento; cfr. Figura 9) ha conseguenze considerevoli, talvolta disastrose. Una volta arrivato sulla sede stradale, infatti, il deflusso che eccede la capacità di smaltimento del manufatto, in genere non prosegue nel suo percorso rientrando in alveo, ma segue la strada fino a sfociare sul versante in una porzione non protetta, innescando pericolose erosioni, saturandolo, ed in generale predisponendolo al dissesto (Figura 10). Si tenga presente, che questo tipo di fenomeno è molto spesso la fonte primaria di detrito e la causa principale di cedimento delle strade agro-silvo-pastorali (Furniss et al., 1997). Le conseguenze della diversione e del successivo deflusso sulla scarpata non protetta, infatti, consistono nell'incisione di un nuovo canale, che rimane instabile per un periodo più o meno lungo, e nell'innesco di franamenti che spesso evolvono in colate detritiche che si riversano direttamente nella rete idrografica o sui tratti sottostanti della strada con un effetto cascata.

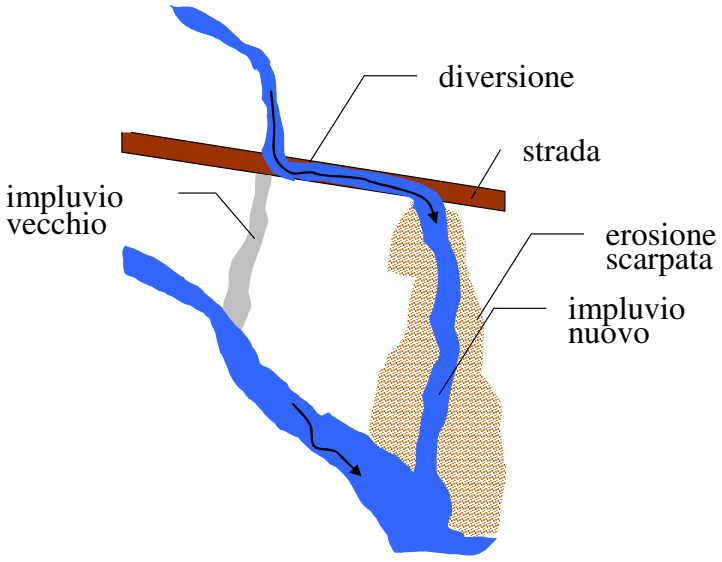


Figura 10: effetto della diversione di un corso d'acqua (da Furniss et al., 1997 modificata)

Una corretta progettazione ed esecuzione della strada nel suo

complesso e nei singoli tratti, quindi, deve essere in grado di gestire opportunamente la circolazione idrica; tale obiettivo può essere perseguito adottando tutti quei provvedimenti che consentono di:

- evitare che il deflusso si concentri sul piano viabile;
- ridurre il più possibile la lunghezza del percorso del deflusso, riducendone così l'erosività e la possibilità che esso prenda direzioni indesiderate (non protette);
- ricollocare il deflusso prodotto ed intercettato dalla strada sui versanti sottostanti o nella rete di drenaggio in modo opportuno, minimizzandone l'impatto erosivo;
- evitare diversioni dei corsi d'acqua e degli impluvi attraversati dalla strada.

Tali obiettivi sono stati recentemente formalizzati da Moll (1999), che ha introdotto un concetto che possiamo definire di "dislocamento[1]" del deflusso, che si concretizza nella minimizzazione di un indice dato dal prodotto tra *volume cumulato di deflusso* e *distanza della deviazione rispetto al percorso naturale*.

Nonostante i progressi della modellistica idrologica, la valutazione di tale indice, purtroppo, è per il momento al di fuori dal campo applicativo a causa della complessità dei processi che governano il fenomeno e della quantità di dati necessari. Da una parte, infatti, il volume di deflusso superficiale prodotto dalla strada può essere calcolato attraverso un approccio modellistico abbastanza consolidato, dall'altra la quantificazione del deflusso sottosuperficiale intercettato è piuttosto complessa e ci si deve accontentare d'indicazioni qualitative relative alla posizione sul versante, all'esposizione o ad osservazioni di tipo morfologico.

Per quanto riguarda la diversione degli attraversamenti dei corsi d'acqua minori e degli impluvi, la predisposizione del singolo attraversamento dipende essenzialmente dalle caratteristiche del tratto di strada in cui si trova e la sua pericolosità dipende dalla portata eventualmente riversata sulla sede stradale, dalla pendenza e dalla lunghezza del tratto, nonché dalla vulnerabilità della scarpata di valle e dalla vicinanza del corso d'acqua.

4.2 Minimizzazione del dislocamento del deflusso

Per raggiungere l'obiettivo di minimizzare il prodotto tra volume di deflusso ed entità della deviazione, è possibile utilizzare diversi schemi costruttivi in combinazione con manufatti di diverso tipo:

[1] Il termine originale utilizzato da Moll (1999) è *displacement*

- *sagomatura del piano stradale* - realizzando la strada con un'opportuna pendenza trasversale è possibile indirizzare il deflusso vero le scarpate di monte o di valle (o ripartirlo equamente), a seconda delle esigenze del singolo tratto (§ 5.3);
- *fondo stradale* - le caratteristiche della superficie stradale influenzano il tasso d'infiltrazione (e quindi l'entità del deflusso superficiale prodotto nel tratto), la scabrezza (e quindi la velocità del deflusso), l'erodibilità (e quindi la quantità di materiale asportato). (§ 6);
- *canalette longitudinali, cunette e berme* - concentrano il deflusso che si forma sul piano viabile evitandone l'erosione ed evitando l'incisione delle scarpate (§ 7.2);
- *drenaggi trasversali e tombinature* - consentono di smaltire il deflusso che si forma sul piano stradale o nelle canalette longitudinali (§ 7.3);
- *pozzetti e pozze di laminazione* - consentono di ridurre i rischi d'intasamento di tombinature e tombotti;
- *protezione dello sbocco delle opere di drenaggio* - evitano l'incisione del versante, riducendo la predisposizione al dissesto (§ 7.2.3.4);
- *cunei drenanti* - sono poco utilizzati in Italia, ma possono risolvere efficacemente i problemi di eccesso idrico e di transito in tratti di concavità (§ 7.4);
- *profilatura e rivestimento delle scarpate* - sono tecniche che permettono di ridurre l'impatto del deflusso che viene indirizzato sulla scarpata di valle (e del relativo sedimento); consistono nella creazione di terrazzi, nella creazione di opere di trattenuta del sedimento o semplicemente nella rivegetazione con specie erbacee ed arbustive.

In generale, per la corretta gestione del deflusso che si produce su di una strada agro-silvo-pastorale, la strategia migliore è quella di segmentarla, al fine di ridurre l'energia del deflusso e di poter adottare la tipologia costruttiva più adeguata al singolo segmento, alternandole a seconda delle esigenze; i singoli tratti, inoltre, devono essere il più possibile indipendenti tra loro, in modo che in caso d'inefficienza di un tratto, il deflusso non si riversi su quello successivo. Lo smaltimento su versante o in rete del deflusso prodotto di ciascun tratto, infine, deve avvenire senza innescare erosioni concentrate (Figura 11).

Il livello di dettaglio richiesto da questo tipo d'impostazione è sicuramente elevato, ma costituisce un investimento di sicuro rendimento, sia in termini di minore manutenzione della strada che di impatti sul territorio. Nel caso si intervenga su strade esistenti si dovrebbero eseguire una serie di sopralluoghi durante o immediatamente dopo eventi di precipitazione significativi al fine di identificare il più accuratamente possibile i percorsi dell'acqua ed i punti

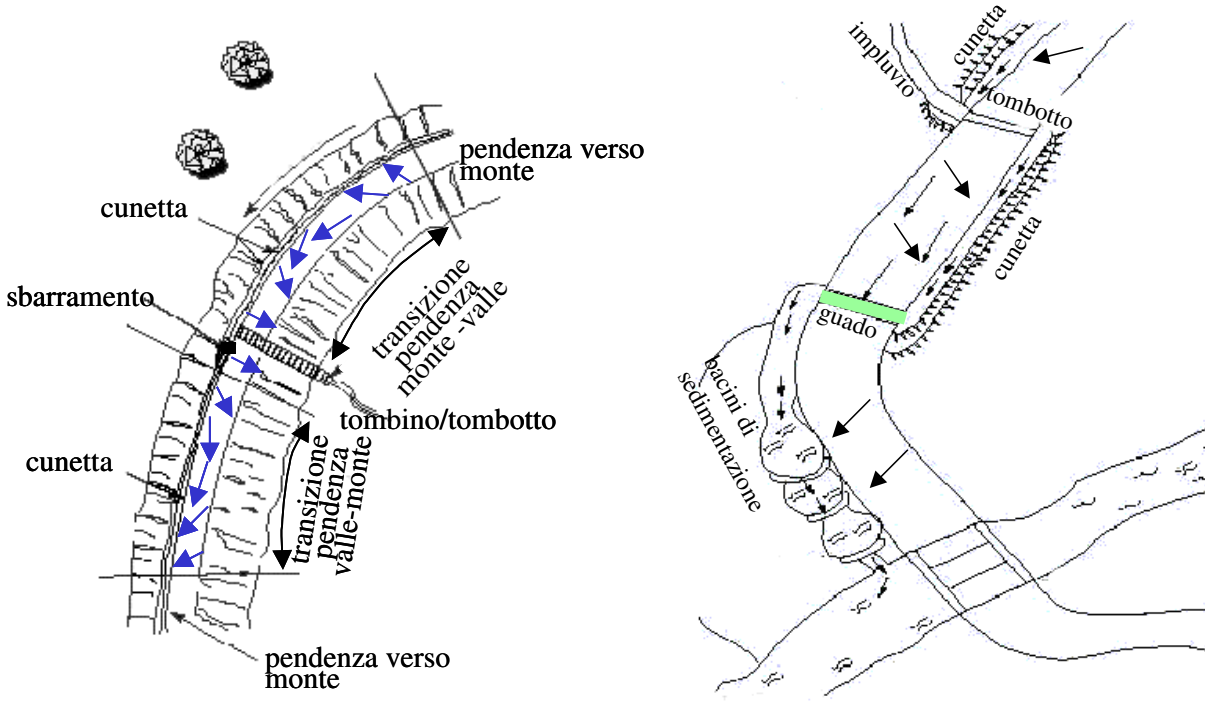


Figura 11: esempi di utilizzo integrato di opere di drenaggio e piano stradale (modificate da Moll, 1999 e da Gonzales, 1998)

critici; tale indagine assume una particolare importanza nel caso in cui l'oggetto della progettazione sia una manutenzione straordinaria in quanto il tratto in oggetto ha già presentato problemi.

Nella definizione dello schema di gestione del deflusso, la cui ossatura è costituita dall'integrazione tra piano stradale, fondo, canalette trasversali, tombinature ed attraversamenti, occorre considerare i seguenti aspetti:

- caratteristiche del versante: substrato, spessore del suolo (evidenzia la possibilità che la strada intercetti deflusso sottosuperficiale), esposizione e vegetazione (indicano la propensione alla desaturazione per evaporazione ed evapotraspirazione), posizione sul versante (i tratti al piede del versante hanno maggiori probabilità di saturazione);
- caratteristiche ipotizzate per il segmento stradale: allineamento (rettilineo o curva), pendenza, sagomatura del piano stradale (pendenza verso monte o valle, baulatura), stagione di utilizzo, tipologia di mezzi ed intensità di transito;
- caratteristiche del sistema di drenaggio ipotizzato: tipologia, spaziatura, manutenzioni necessarie;
- protocollo di manutenzione che può essere effettivamente realizzato.

4.3 Elementi progettuali

Gli elementi da considerare nell'ambito della progettazione e realizzazione della viabilità agro-silvo-pastorale, nell'ottica di un approccio integrato, sono ovviamente molti, ciascuno dei quali potrà risultare più rilevante di altri a seconda delle specifiche caratteristiche locali e della tipologia di utilizzazione prevalente.

Sulla base di quanto esposto nei precedenti capitoli, tuttavia, gli aspetti legati alla circolazione idrica ed i processi ad essa correlati sono da ritenersi prioritari. I fattori legati agli impatti più generali della strada (densità della rete viaria, impatti sulla fauna e sulla flora dell'area, ecc.), come premesso, andrebbero considerati a livello di pianificazione.

Gli elementi progettuali dovranno quindi riguardare:

- Caratteristiche geometriche della strada (pendenza massima e tipologia);
- Tipologia di fondo;
- Dimensionamento della rete di smaltimento delle acque;
- Tipologia dei manufatti di smaltimento delle acque;
- Opere di attraversamento dei corsi d'acqua;
- Pendenze massime ammissibili delle scarpate di monte e di valle;
- Opere consigliate per la mitigazione degli impatti.

Tali elementi costituiscono l'oggetto dei capitoli seguenti.

5 CARATTERISTICHE GEOMETRICHE DELLE STRADE AGRO-SILVO-PASTORALI

5.1 Terminologia

Con riferimento alla Figura 12, una strada agro-silvo-pastorale può essere distinta nei seguenti elementi:

- *asse stradale* - dato dalla successione dei punti di mezzeria della strada;
- *piano stradale* o *carreggiata* - dato dalla porzione di strada disponibile per il passaggio dei veicoli;
- *banchine* - date dalle strisce che delimitano il piano stradale, possono essere o meno transitabili;
- *cunette* - canalette laterali che raccolgono le acque che si formano sulla carreggiata, possono essere rivestite o in fondo naturale;
- *piattaforma stradale* - data dall'insieme di carreggiata e banchine (in genere coincide con la base dello strato stabilizzato);
- *scarpate di monte* e *di valle* - pendii artificiali ottenuti dalle operazioni sterro e riporto;
- *strada propriamente detta* - compresa tra le scarpate;
- *fasce di rispetto* - fasce ai lati della strada propriamente detta che devono essere considerate di sua pertinenza e parzialmente esboscate.

Le caratteristiche geometriche di una strada, oltre che a rispondere ai requisiti imposti dalle caratteristiche dei mezzi per i quali è previsto

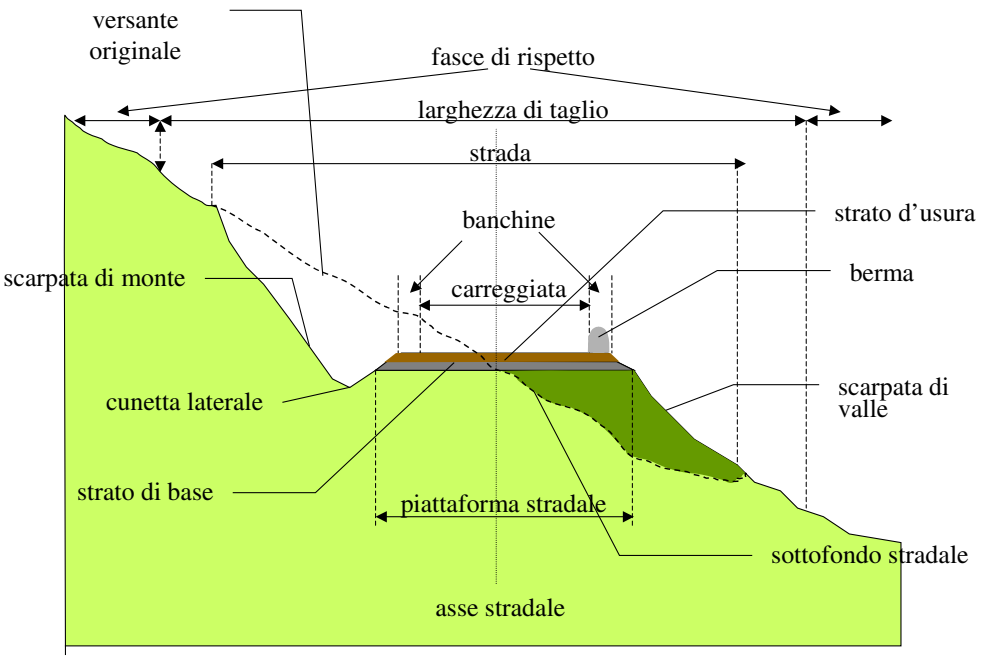


Figura 12: terminologia adottata per le strade agro-silvo-pastorali

il transito, possono giocare un ruolo rilevante ai fini della gestione della circolazione idrica e dei fenomeni ad essa correlati (cfr. capitoli 3 e 4).

Nella progettazione e nella realizzazione delle strade agro-silvo-pastorali, in particolare, le caratteristiche geometriche del piano stradale devono essere definite in modo tale da ridurre la lunghezza del deflusso superficiale ed al tempo stesso da evitare ristagni. Un consistente deflusso superficiale, infatti, tende a concentrarsi e generare tensioni sufficienti a creare fenomeni erosivi significativi; più lungo è il percorso dell'acqua, inoltre, e maggiore è la possibilità che essa venga deviata verso aree sensibili. La saturazione del terreno, infine, oltre ad ingenerare condizioni pericolose per la circolazione dei mezzi, favorisce l'incisione del piano stradale da parte delle ruote (soprattutto in caso di slittamento), e quindi la creazione di vie preferenziali per il deflusso che si concentra, alterando la geometria iniziale.

La lunghezza del percorso dell'acqua sul piano stradale è determinata dalla combinazione delle caratteristiche geometriche della strada: pendenza trasversale, pendenza longitudinale e larghezza (Figura 13).

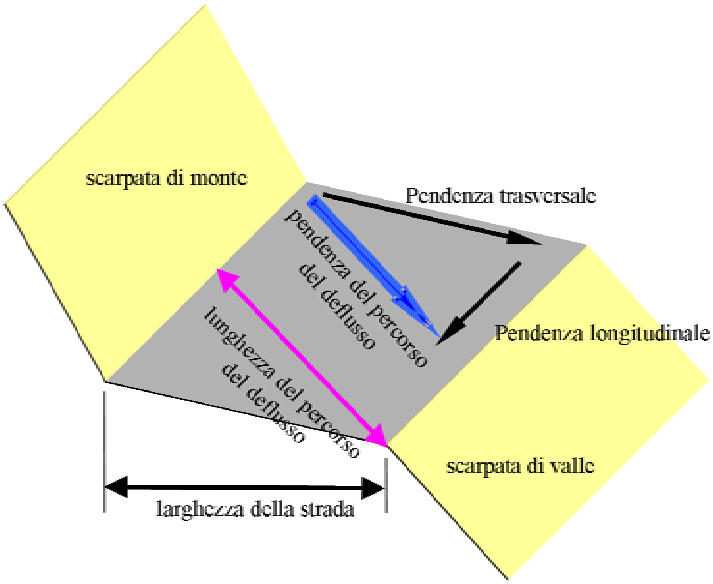


Figura 13: lunghezza e pendenza del percorso del deflusso sul piano viabile

5.2 Andamento plano-altimetrico

5.2.1 Pendenza longitudinale massima

In generale è molto difficile dare prescrizioni rigide sulla pendenza massima che può deve essere data ad un tratto di strada agro-silvo-pastorale; fatti salvi i limiti di sicurezza imposti dalla combinazione tra caratteristiche del mezzo e carico trasportato, infatti, dal punto di vista degli impatti sulla circolazione idrica si possono avere effetti drasticamente differenti a parità di pendenza longitudinale in funzione della sagomatura del piano stradale, della tipologia di fondo, dalla presenza di manufatti per l'intercettazione e lo sgrondo delle acque superficiali e della loro efficienza, nonché delle caratteristiche pluviometriche.

Le prescrizioni che si trovano in letteratura, tuttavia, sono relativamente concordi nell'indicare una pendenza ottimale intorno all'8÷10% e come limite massimo una pendenza del 18÷20% nel caso di strade pavimentate e dotate di adeguati manufatti e del 14÷16% nel caso di strade a fondo naturale; la pendenza minima deve essere superiore al 2% affinché non si abbiano ristagni.
La pendenza da assegnare a ciascun tratto, deve essere attentamente valutata in relazione allo schema complessivo di gestione del deflusso di cui fanno parte, lo ricordiamo, sagomatura e copertura del piano stradale (cfr. § 5.3), tipologia e spaziatura dei drenaggi trasversali (cfr. § 7.3).

5.2.2 Curve e tornanti

Le curve, indispensabili per lo sviluppo di un tracciato, quando si trovano in tratti caratterizzati da una pendenza longitudinale possono rappresentare un punto critico sia dal punto di vista della transitabilità e della sicurezza, sia dal punto di vista della circolazione idrica e dei suoi effetti; criticità ancora maggiore nel caso si tratti di tornanti.
In prossimità delle curve e soprattutto dei tornanti, occorre ridurre al minimo la possibilità che i mezzi si arrestino; arresti e riprese, infatti, oltre a peggiorare la qualità e la sicurezza del transito aumentano la possibilità di creare solchi sul piano stradale con le conseguenze citate precedentemente. I tornanti, in particolare, dovrebbero essere sempre preceduti e seguiti da tratti di raccordo a pendenza moderata, ove collocare i manufatti per il drenaggio. In generale, le curve dovrebbero avere raggi compresi tra 15 e 20 metri ed una pendenza inferiore del 4% rispetto ai tratti limitrofi (Darrach et al., 1981 cit. Wiest, 1998), mentre i tornanti dovrebbero avere raggi compresi tra 5 e 10 metri ed una pendenza del 4÷5%, fino all'8% in casi eccezionali (Mazzalai, 1987; British Columbia Forest Code, 1995; Wiest, 1998).

5.2.3 Diramazioni, dossi e cunette

Tutti i punti in cui si ha una brusca variazione della pendenza, devono essere adeguatamente raccordati tra loro.
In generale, nel caso delle diramazioni è bene avere in entrambi i segmenti il primo tratto dopo la separazione con pendenza uguale (Figura 14); la lunghezza di tale tratto deve essere superiore alla media delle larghezze dei due tratti (Darrach et al., 1981 cit. Wiest, 1998).

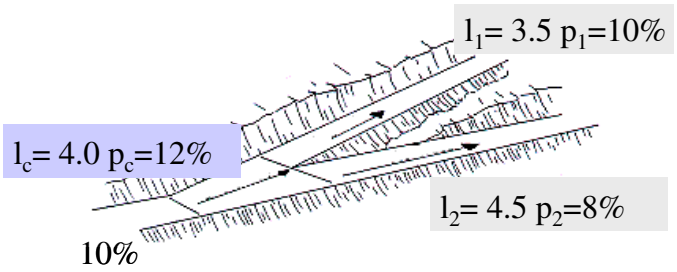


Figura 14: esempio di realizzazione di un bivio

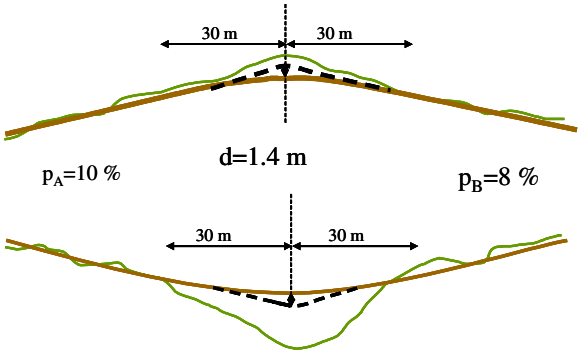


Figura 15: esempio di raccordo di dossi e avvallamenti (mod. da Wiest, 1998)

Nel caso di dossi e cunette, invece, i due tratti (*A* e *B*) con pendenza opposta (p_A e p_B) devono essere raccordati alzando o abbassando il punto di flesso. Darrach et al. (1981 cit. Wiest, 1998) propongono di variare l'altezza di un aquantità *d* [m] pari a:

$$d = 0.0762\left(p_A + p_B\right)$$

i due tratti di raccordo devono essere di almeno 30 m (Figura 15).

5.3 Sagomatura del piano stradale

Il piano stradale può essere sagomato secondo diverse tipologie possibili (Figura 16):

- Piano con pendenza uniforme verso monte;
- Piano con pendenza uniforme verso valle;
- Piano con baulatura.

Qualsiasi sia la tipologia di piano, la pendenza trasversale deve essere compresa tra il 2% e il 4% in funzione del substrato, del clima, della pendenza longitudinale e del tipo di mezzi che vi transiteranno; pendenze inferiori rischiano comunque di favorire il ristagno dell'acqua, mentre pendenze superiori non sono consigliabili perché

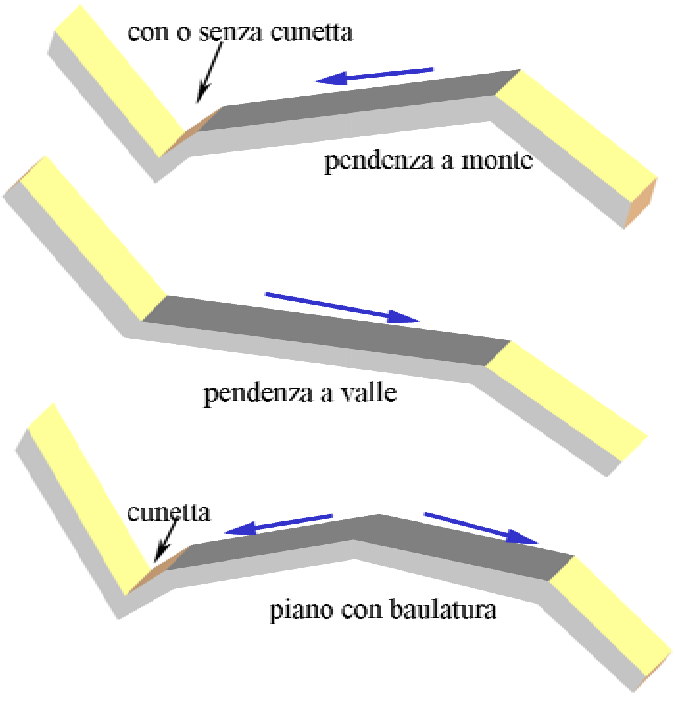


Figura 16: tipologie di piano stradale

riducono la sicurezza del transito.

La sola sagomatura del piano stradale non è comunque ritenuta sufficiente ad assicurare lo smaltimento delle acque per pendenze longitudinali superiori al 5% nel caso di strade non pavimentate e all'8% nel caso di strade pavimentate (Moll et al., 1997); nei casi di pendenze superiori (o quando il piano è inciso dai solchi lasciati dai mezzi) occorre utilizzare anche i drenaggi trasversali (cfr. § 7.3).

In genere, lungo una strada, la tipologia di piano non è unica, ma deve essere realizzata combinando le differenti tipologie al fine di realizzare, insieme all'utilizzo delle opere idrauliche, un'efficace strategia di gestione delle acque (cfr. § 4.2).

5.3.1 Piano stradale con pendenza "a monte"

Lo scopo di questo tipo di sagomatura è quello di indirizzare il deflusso che si forma sul piano stradale verso la scarpata di monte dove viene raccolto in un'opera di drenaggio longitudinale, evitando che esso raggiunga la scarpata di valle (Figura 17); il deflusso viene poi convogliato in impluvi o smaltito sul versante di valle in maniera controllata, attraverso tombini o canalette posizionati con una frequenza sufficiente ad evitare erosioni al fondo della cunetta o un eccesso di portata che si riverserebbe sul piano stradale. Per lo stesso motivo, le cunette devono essere oggetto di una regolare manutenzione.

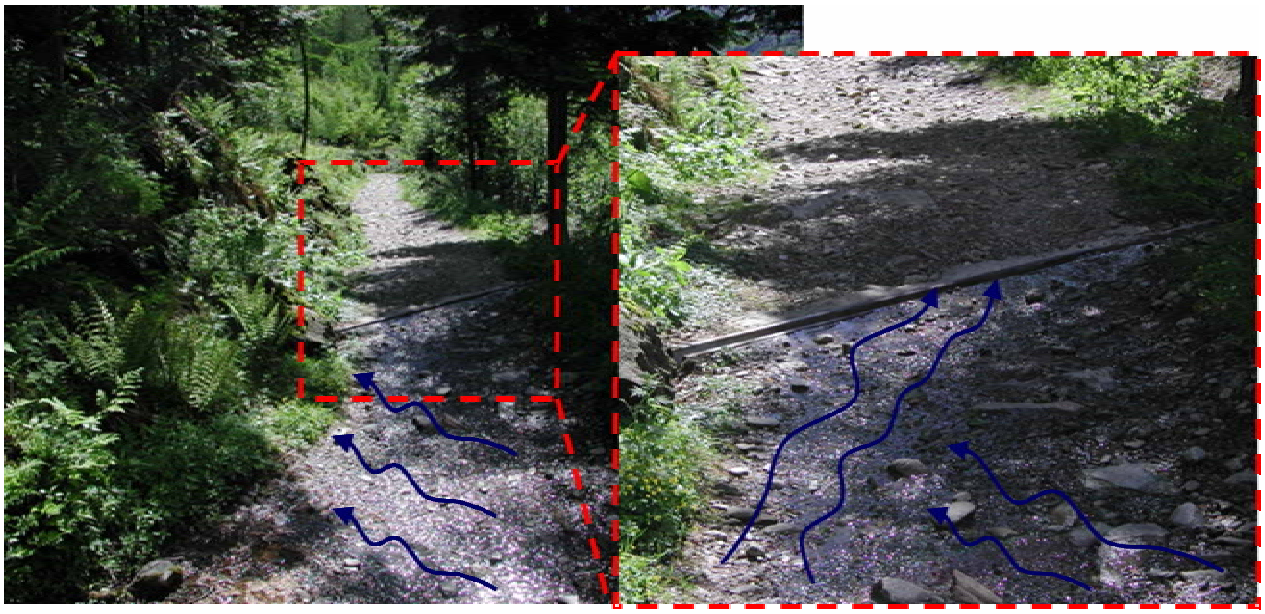


Figura 17: il piano conpendenza verso monte consente di gestire con maggior precisione il deflusso che dovesse riversarsi sul piano stradale dal versante di monte o da un impluvio

Il vantaggio di questo tipo di sagomatura è che si ha un maggior controllo dei punti di smaltimento del deflusso sia sulla scarpata di valle, che nella rete idrografica, con la possibilità di realizzare opere per la protezione dall'erosione (sostanzialmente piccoli manufatti in grado di dissipare una parte dell'energia); la pendenza verso monte, inoltre, garantisce condizioni di maggior sicurezza al transito in caso di fondo scivoloso dovuto ad eventi meteorici intensi o precipitazioni nevose e presenza di ghiaccio. Questa tipologia è particolarmente indicata nei casi in cui le scarpate di valle sono facilmente erodibili in quanto ne allontana il deflusso che si produce sulla sede viaria.

La presenza di un'opera di drenaggio al piede della scarpata di monte comporta anche l'intercettazione del deflusso sottosuperficiale con il vantaggio di ridurne la saturazione e la quantità d'acqua che raggiunge il piano stradale. Gli svantaggi di questa soluzione risiedono nella necessità di una maggiore larghezza complessiva dell'opera per inserire il drenaggio longitudinale con conseguente maggiori oneri di scavo e maggior disturbo all'area circostante. Nel caso di suoli facilmente erodibili, inoltre, bisogna tenere presente la possibilità che dalla scarpata di monte pervenga materiale solido che può ostruire il drenaggio deviando il deflusso sulla sede stradale con tutte le conseguenze del caso. In ambienti a spiccata propensione all'erosione occorre anche prevedere dispositivi di intercettazione e di deposito del sedimento trasportato dal drenaggio laterale al fine di evitare l'intasamento dei drenaggi trasversali che smaltiscono il deflusso sul versante o nella rete idrografica.

Riassumendo, l'uso della pendenza verso monte è maggiormente indicato nelle seguenti situazioni:

- rischio di erosione della scarpata di valle;
- possibilità di drenaggi trasversali frequenti per smaltire la portata dalle cunette;
- pendenze elevate della strada o del versante;
- immissione concentrata del deflusso che non influenza l'ambiente circostante in maniera significativa;
- necessità di elevati livelli di percorribilità;
- frequenti condizioni critiche in termini di aderenza;
- in curva purché non in corrispondenza di attraversamenti degli impluvi (cfr. § 4.1).

È invece sconsigliato su basse pendenze o per deflussi limitati, dove è invece meglio orientarsi verso una tipologia con pendenza verso valle (Haussman e Pruett, 1973; Packer e Christensen, 1964; Swift, 1985).

5.3.2 Piano stradale con pendenza "a valle"

La pendenza del piano stradale verso valle indirizza il deflusso superficiale in forma diffusa verso la scarpata di valle dove può disperdersi infiltrandosi nel suolo.

Questo tipo di soluzione ha il vantaggio di ridurre al minimo la larghezza complessiva della strada, di minimizzare l'interferenza con i processi idrologici naturali, d'essere più economica rispetto alla precedente; essa, inoltre, evita tutti i problemi legati alla presenza dei drenaggi longitudinali a contatto con la scarpata di monte.

Fermo restando la necessità di associarla ad opere trasversali di drenaggio, se non per pendenze modeste, occorre valutare attentamente le conseguenze dell'incremento del contenuto idrico nella scarpata di valle, che ne può provocare la destabilizzazione

Per l'efficacia di questa soluzione occorre avere la massima cura nella compattazione del ciglio di valle durante la costruzione e di prevedere le manutenzioni al fine di evitare la formazione di berme e di solchi dovuti al passaggio degli autoveicoli che alterano drasticamente la direzione del deflusso superficiale vanificando la sagomatura iniziale; l'effetto dei solchi può essere ridotto dalla presenza di opere di drenaggio trasversali (cfr. § 7.3).

Poiché il deflusso che si forma sul piano stradale e che proviene dal versante a monte viene riversato sulla scarpata di valle, si ribadisce che tale soluzione non è idonea in terreni facilmente erodibili, specialmente in prossimità di curve, o dove la saturazione può innescare franamenti.

Dal punto di vista del transito, la pendenza verso valle dà agli autisti una spiacevole impressione d'insicurezza che diviene effettiva in condizioni avverse (fango, neve, ghiaccio).

L'uso più efficace di questa soluzione si ha quando:

- è importante mantenere una buona distribuzione del deflusso sul versante di valle per ragioni ecologiche;
- si hanno pendenze limitate;
- la pendenza verso monte può innescare erosioni al fondo del canale laterale o al piede della scarpata di monte;
- il tratto è sede di un attraversamento di un impluvio con potenziale diversione (cfr. § 4.2).

Quando questa sagomatura viene eseguita correttamente ed è associata ad opere di smaltimento dell'acqua trasversali e ad una costante manutenzione, può effettivamente costituire il metodo più efficace ed economico per le strade agro-silvo-pastorali.

5.3.3 Piani con baulatura

Si tratta di una combinazione delle due tipologie precedenti, che viene ormai utilizzata raramente nelle strade agro-silvo-pastorali, la cui larghezza è data dai mezzi meccanici utilizzati per realizzarle. In linea di principio, questa soluzione è quella ottimale in quanto associa i vantaggi delle due tipologie precedenti, minimizzandone gli svantaggi. In particolare rimane fortemente consigliabile per strade con elevata pendenza longitudinale e che si trovano spesso in condizioni di fondo difficili; inoltre, dà sicurezza nella guida in qualunque condizione del fondo. L'utilizzo dei mezzi meccanici per la realizzazione delle strade agro-silvo-pastorali, caratterizzate da una larghezza modesta, la rendono una soluzione non realizzabile in condizioni normali.

5.3.4 Criteri di scelta della tipologia di piano stradale

Per la scelta della tipologia di piano stradale più idonea alla specifica situazione, come è stato più volte ricordato, occorre considerare l'intero schema di gestione delle acque in cui il piano stradale è solo uno degli elementi (cfr. § 4.3 e § 7.1). Limitandosi per il momento a considerare solo quest'ultimo, occorre prendere in considerazione i seguenti fattori:

- pendenza del tratto di strada;
- larghezza possibile per il piano stradale;
- stabilità delle scarpate;
- effetti ecologici della concentrazione del deflusso sulle area adiacenti;
- tipo di fondo;
- possibilità di manutenzione;
- tipologia di mezzi in transito e sicurezza richiesta;

La scelta della tipologia più adatta al singolo tratto, deve quindi essere attentamente valutata, confrontando le caratteristiche delle diverse soluzioni; a tal fine è possibile avvalersi dello schema riassunto nella Tabella III.

Indipendentemente dalla tipologia di piano stradale prescelta, occorre prevedere l'installazione di drenaggi trasversali (per i quali vi è un'ampia scelta) in grado di riconvogliare il deflusso nella direzione voluta nel caso di un'alterazione della geometria di progetto; generalmente, infatti, con il transito dei mezzi si formano sul piano stradale dei solchi che costituiscono una via preferenziale per il deflusso superficiale alterandone la direzione di scorrimento iniziale. Si tenga presente che in caso deflusso concentrato, l'acqua acquista rapidamente la forza necessaria a provocare erosioni significative; a titolo di esempio, un solco nel senso della pendenza

longitudinale largo 50 cm e profondo solamente 2 cm è in grado di interrompere il deflusso trasversale, vanificando la sagomatura iniziale (Moll et al., 1997).

Tabella III: caratteristiche delle diverse tipologie di piano stradale (da Moll et al., 1997 modificata)

Fattore	Pendenza verso monte	Pendenza verso valle	Baulatura
Scopo	Dirigere il deflusso superficiale verso la scarpata di monte o la cunetta laterale	Dirigere e disperdere il deflusso superficiale verso la scarpata di valle	Suddividere il deflusso superficiale tra scarpata di monte o drenaggio laterale e scarpata di valle
Requisiti costruttivi	Maggiore larghezza dell'infrastruttura		Difficilmente realizzabile meccanicamente su corsia singola
Manutenzione	Piano stradale, cunette e tombinature	Piano stradale e scarpata di valle	Piano stradale, cunette, tombinature e scarpata di valle
Erosione potenziale	Cunette, piano stradale, canalette e raccordi	Piano stradale, scarpata di valle, guadi e raccordi	Entrambe le precedenti ma in minor misura
Stabilità del versante	Le cunette possono richiedere scavi profondi e causare instabilità della scarpata di monte	Le scarpate di valle possono saturarsi e divenire instabili	Entrambe le precedenti ma in minor misura
Percorribilità coi mezzi	Discreta	Da scarsa a discreta	Buona
Sicurezza dei mezzi	Buona	Da scarsa a discreta in funzione del clima	Buona
Dove usarla	Scarpate di valle instabili ed erodibili, pendenze elevate, frequente presenza di neve, ghiaccio e fango	Scarpate di valle stabili, basse pendenze	Scarpate di valle instabili ed erodibili, pendenze elevate, climi sfavorevoli
Dove non usarla	Alta probabilità d'intasamento dei tombotti. Scarpate di monte o cunette laterali che non possono essere protette	Pendenze elevate, scarpate di valle instabili	Aree in cui risulta adeguata la pendenza verso valle

6 FONDO STRADALE[2]

6.1 Introduzione

Le tipologie costruttive del fondo stradale sono molteplici e competono all'ambito delle costruzioni stradali e dati gli obbiettivi del presente lavoro esse verranno solamente accennate e trattate dal punto di vista delle loro interazioni con i processi idrologici ed erosivi; per una trattazione dettagliata degli aspetti costruttivi si rimanda ai testi specialistici di costruzioni forestali.

In linea di principio, una strada non è altro che una sovrastruttura posta a contatto con il terreno naturale o di riporto (*sottofondo*), che è in grado di trasmettere e distribuirvi i carichi dei mezzi, senza subire deformazioni che possano essere d'ostacolo al transito stesso.

Tale obbiettivo si ottiene creando al di sopra del sottofondo una serie di strati, che dal basso verso l'alto sono definiti (Figura 18):

- *strato di fondazione*.
- *strato di base*
- *manto di usura*

Il numero e lo spessore degli strati dipendono essenzialmente dalla resistenza che si richiede alla sovrastruttura, in rapporto al tipo ed all'intensità del traffico che dovrà sopportare la strada ed alle caratteristiche del terreno.

L'insieme strato di base-strato di fondazione costituisce la struttura portante della sovrastruttura ed ha la funzione di mantenere inalterata la configurazione del manto d'usura, sopportando e distribuendo sul sottofondo le sollecitazioni dovute al traffico.

I diversi strati che costituiscono la sovrastruttura sono costituiti da materiali lapidei grossolani (il cosiddetto "inerte"), con o senza "legante", posti in opera a strati omogenei sovrapposti, di

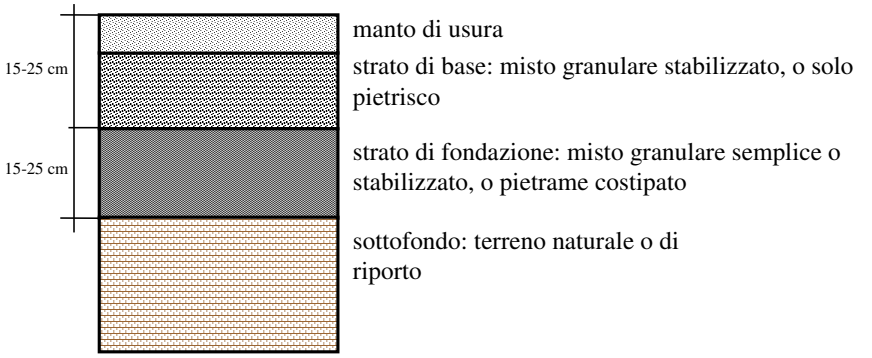


Figura 18: Struttura del solido stradale

[2] Il capitolo è stato redatto con il contribuito del Dr. Tommaso Simonato

caratteristiche meccaniche (attrito e coesione) decrescenti dall'alto verso il basso, così come le sollecitazioni cui gli strati stessi sono soggetti. Il numero, la qualità e lo spessore degli strati variano in funzione del traffico, del carico massimo per ruota, della portanza del sottofondo, della durata prevista per l'intera opera o del solo manto di usura. Lo *strato di fondazione* può essere costituito da una miscela di ciottoli di grandi dimensioni, sabbia e argilla; lo *strato di base*, invece, può essere costituito da materiale granulare sciolto, da conglomerato bituminoso o da calcestruzzo (Mazzalai, 1987).

Il *manto d'usura* è quello direttamente esposto alle azioni del traffico e degli agenti atmosferici, e man mano che se ne riduce lo spessore è necessario intervenire prima che si abbia il danneggiamento dello strato di base e quindi della struttura portante della strada.

Il *sottofondo*, infine, deve essere opportunamente costipato ed avere una scabrezza sufficiente affinché lo strato di fondazione vi aderisca e faccia corpo con esso.

6.2 Schemi semplificati

Nella costruzione delle strade agro-silvo-pastorali (per le quali si tende a limitare i costi costruttivi), frequentemente non è possibile adottare lo schema precedentemente esposto che, sebbene garantisca una migliore durata ed efficienza dell'opera, viene ritenuto eccessivamente oneroso.

Uno schema comunemente adottato per questo tipo di viabilità, quindi, prevede solamente due strati posti sopra il fondo naturale: uno strato di fondazione (che ingloba anche lo strato di base) e uno strato di pavimentazione con funzione di strato di usura (Bortoli, 1982; Mazzalai, 1987). Lo strato di fondazione dovrebbe essere costruito "a cuneo" depositando pietrisco alla rinfusa (15÷25 cm con diametro 60÷80 mm) in maggior quantità al centro della strada rispetto a quanto viene fatto ai lati. Dopo averlo costipato, si deposita uno strato di ghiaia mista a sabbia (diametro 0÷8 mm) con funzioni di strato di usura, anch'esso opportunamente costipato (Figura 19). Per ragioni di economia, se è possibile, viene usato materiale ricavato in posto.

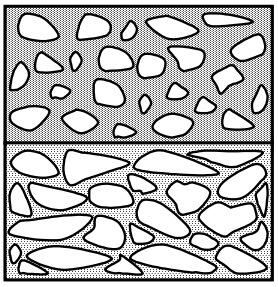


Figura 19: Sovrastruttura con fondazione e pavimentazione realizzate con il materiale disponibile in sito

Affinché questo schema sia efficace la sovrastruttura deve appoggiare su un terreno con portanza sufficiente (secondo Bortoli, 1982, almeno 8 t per asse).

In caso di necessità la portanza del sottofondo può essere migliorata utilizzando un geotessuto che, oltre a fungere da separatore tra i diversi strati, contribuisce a ripartire uniformemente i carichi.

Figura 20: operazioni di compattazione del fondo stradale (da Bortoli, 2001)

Nel caso in cui il substrato abbia una portanza sufficiente, la fondazione può anche mancare, ed è possibile adottare uno schema di riferimento ulteriormente semplificato che prevede solamente operazioni di movimento terra. In questo modo il fondo è costituito semplicemente dal terreno naturale opportunamente costipato e "ricaricato" con uno strato di ghiaia; affinché questa soluzione dia risultati accettabili, tuttavia, è indispensabile che la compattazione venga eseguita mediante un rullo (Figura 20) e non attraverso il semplice passaggio dell'escavatore che realizza la strada, anche se ripetuto più volte.

Un tale schema è spesso utilizzato per ragioni d'economia anche dove le caratteristiche del terreno non lo consentirebbero, con conseguenze negative in termini di durata, di condizioni di transitabilità e di sicurezza del transito. È infatti importante ricordare che un fondo inadeguato, alterandosi facilmente può compromettere la geometria iniziale della strada modificando i flussi idrici ed innescando fenomeni di dissesto significativi.

6.3 Interventi di stabilizzazione

6.3.1 Geosintetici

In presenza di terreni naturali instabili a granulometria fine (ad esempio terreni argillosi e limosi) dotati di ridotta capacità portante e dove maggiore è la possibilità di contaminazione della fondazione o dello strato di base, è indicato l'utilizzo di geosintetici da porre tra fondazione e sottofondo che separano gli strati e ripartiscono i carichi.

In particolare, l'impiego di tale tecnica risulta particolarmente vantaggioso su brevi tratti e dove risulti difficoltoso reperire quantità sufficienti di materiale grossolano per realizzare uno strato di

consolidamento del fondo naturale di spessore adeguato al carico transitabile. Le caratteristiche strutturali di questi materiali, infatti, consentono di sfruttarne le funzioni di:

- *drenaggio e filtrazione* - la struttura porosa, e quindi molto permeabile, del materiale trattiene le particelle più fini (limo e argilla) lasciandosi attraversare dalle acque di deflusso;
- *rinforzo* - garantisce una migliore distribuzione dei carichi concentrati legati al traffico su superfici più estese e consente, durante l'esecuzione dei lavori, di circolare sullo strato di fondazione proteggendolo da qualsiasi contaminazione.

6.3.2 Inghiaiatura

Una delle più comuni tecniche di stabilizzazione del fondo stradale è costituita dalla stesura di uno strato di ghiaia e sabbia dello spessore di 5÷10 cm, preferibilmente costituito da materiali calcarei a spigolo vivo, opportunamente costipato con rullo o molto più spesso, sebbene non sia consigliabile, con ripetuti passaggi dei mezzi usati per il movimento terra. Nel caso la copertura venga realizzata con terreno granulare senza correttivi essa viene definita *tout venant*, mentre se durante la rullatura si provvede ad intasare il materiale grossolano con materiale fine, viene definita *macadam ordinario*.

La presenza dello strato di materiale grossolano ha l'effetto di ridurre l'erodibilità del terreno e di aumentare la capacità d'infiltrazione delle acque di scorrimento. Circa gli effetti sulla riduzione del tasso di erosione del piano stradale, nella letteratura statunitense vi sono diversi riferimenti (Burroughs e King 1989; Kochenderfer e Helvey 1987; Burroughs et al. 1984; Swift 1984), secondo i quali una ricarica del fondo stradale realizzata con uno spessore variabile da 10 a 15 cm di ghiaia e pietrisco (diametro di 3.5÷4.0 cm), può ridurre l'erosione del 70÷80% o anche più quando combinata con un adeguato rinverdimento ai margini della carreggiata. Ovviamente l'entità della riduzione dipende fortemente dal tipo di sottofondo (roccia o terreno), dalle caratteristiche costruttive della strada (tipologia del piano stradale e pendenze), dalle condizioni climatiche e dalla cura con cui vengono effettuati gli interventi di protezione e manutenzione del piano stradale.

La ricarica con materiale grossolano è sicuramente la soluzione preferibile nella maggior parte delle situazioni.

6.3.3 Battuto di cemento

Questo tipo di rivestimento è costituito da una gettata di cemento, eventualmente preceduta dalla posa di una rete elettrosaldata per migliorare la portanza del terreno naturale, che deve essere comunque costipato e regolarizzato per evitare rotture sotto carico.

I vantaggi di questa soluzione sono la durata, l'inerodibilità, la resistenza all'usura dovuta al passaggio dei mezzi, la portanza e la sicurezza al transito. Al contempo, il rivestimento in

Figura 21: Realizzazione di un battuto di cemento (Bortoli, 2001)

cemento è poco indicato con sottofondo non sufficientemente stabile, dove a causa della sua rigidità può fratturarsi; esso, inoltre, richiede un'attenta regimazione del deflusso superficiale (preferibilmente attraverso cunette laterali) e non è consigliabile in zone a rilevante interesse ambientale per l'impatto visivo.

Può essere una soluzione efficace ed economica nei tornanti e nei tratti a maggior pendenza.

Figura 22: rivestimento in cemento con carrarecce in mattoni

6.3.4 Rivestimento in cemento con carrarecce

Una soluzione mista tra il rivestimento in cemento e l'acciottolato è quella che vede l'inserimento di "binari" in mattoni o in pietrame a maggior resistenza e scabrezza su cui transitare (Figura 22). Il loro utilizzo è indicato in condizioni pendenza elevata, ma essendo una sovrastruttura rigida, è suscettibile di rotture nel caso la scarpata di valle sia soggetta a cedimenti.

6.3.5 Acciottolati e selciati

Figura 23: ciottolato a secco

I rivestimenti in ciottolato e selciato sono realizzati disponendo materiale lapideo, rispettivamente di forma irregolare e regolare, su un fondo di sabbia, malta o calcestruzzo. Questi tipi di rivestimento, essendo eseguiti a mano, consentono di sagomare il piano stradale "a schiena d'asino" e richiedono una cunetta laterale (Figura 23; Figura 24).

Questo tipo di soluzione è molto resistente al transito ed efficace nei confronti dell'erosione, ma a causa dell'elevato onere di realizzazione, sono consigliati solamente per ripristinare tratti di strada ad elevata rilevanza storico-naturalistica.

Figura 24: selciati realizzati in pietrame e malta con sottofondo armato

6.3.6 Leganti

L'utilizzo di leganti consiste nella stesura di uno strato uniforme e continuo di legante sullo strato granulare e fatto penetrare nello stesso fino a saturazione. Ne risulta così un "tappettino" dello spessore di circa 1 cm che ha la proprietà di non essere rigido ma plastico, sopportando senza arrivare a rottura i carichi del traffico, trasferendoli così al sottofondo.

I principali tipi di leganti sono:

- emulsioni bituminose a caldo o a freddo di vario genere;
- calce, cementi, pozzolana;
- resine di vario genere.

L'uso di leganti bituminosi è largamente diffuso in Svizzera e negli U.S.A., mentre in Italia è raro anche se il loro impiego sulle strade agro-silvo-pastorali sarebbe indicato quando servono un traffico intenso, esboschi consistenti, o su tratti con pendenza > 6 % in zone montuose con precipitazioni annue > 800 mm (Mazzalai, 1997).

Negli ultimi anni le emulsioni bituminose tradizionali, sono state affiancate da bitumi modificati che permettono la realizzazione di interventi che garantiscono una migliore integrazione ambientale ed ecologica in quanto consentono di ottenere un manufatto che esteriormente assume l'aspetto della terra battuta, ma che presenta ottime caratteristiche di stabilità interna, portanza e resistenza agli agenti atmosferici. Questo tipo di soluzione consente di contemperare l'esigenza di migliorare il transito sulle strade con fondo stabilizzato mediante le tecniche tradizionali, che sono spesso disagevoli, insicure e che richiedono continue e costose manutenzioni con elevato consumo d'inerti, con la consapevolezza della necessità di ridurre l'impatto delle strade nelle aree di rilevante interesse ambientale.

6.3.7 Cippato

Questa tecnica, discretamente diffusa negli Stati Uniti, ma praticamente inutilizzata in Italia, consiste nel distribuire sul fondo cippato di legname (Figura 25). Essa si è dimostrata utile per ridurre l'erosione ed assorbire parte del deflusso su strade a modesta pendenza, ma presenta anche effetti sfavorevoli, quali il rischio di incendi, la riduzione dell'aderenza dei mezzi, la rapida riduzione di efficienza del rivestimento.

Può essere efficacemente utilizzata come rivestimento temporaneo su tracciati utilizzati quali le piste durante le operazioni d'esbosco.

Figura 25: distribuzione del cippato su una strada negli USA (da Moll, 1999)

7 MANUFATTI DI SGRONDO DELLE ACQUE SUPERFICIALI E SOTTOSUPERFICIALI

7.1 Introduzione

Al fine di evitare, o almeno mitigare, gli impatti derivanti dalla costruzione delle strade agro-silvo-pastorali occorre gestire in maniera adeguata il deflusso superficiale prodotto dalle strade e da quello sottosuperficiale eventualmente intercettato (cfr. capitolo 4). In combinazione con la sagomatura del piano stradale, devono essere realizzati una serie di manufatti che consentano di intercettare l'acqua ed indirizzarla opportunamente sui versanti o verso la rete idrografica.

Nelle costruzioni stradali di tipo "civile", lo schema classico per lo smaltimento delle acque meteoriche prevede la raccolta del deflusso prodotto sul piano stradale per mezzo di cunette laterali o drenaggi sottosuperficiali, che confluiscono in tombini; questi si raccordano a tubazioni che sottopassano la sede stradale (Figura 26) e smaltiscono il deflusso sui versanti o direttamente nella rete idrografica (o eventualmente in quella fognaria).

Nell'ambito della viabilità agro-silvo-pastorale, questo schema viene utilizzato raramente a causa del costo elevato dovuto alle opere necessarie ed alla larghezza complessiva della strada, che deve comprendere anche la cunetta laterale. Nel caso di pendenze elevate e fondo stradale naturale, comunque, occorre prevedere anche l'impiego di opere trasversali (canalette, deflettori o deviatori) che, riducendo la lunghezza del percorso del deflusso superficiale, permettono di ridurne il potenziale erosivo e la sua eccessiva concentrazione.

Molto più frequentemente, nell'ambito della viabilità agro-silvo-pastorale lo smaltimento delle acque superficiali viene affidato all'uso combinato di un piano viabile con pendenza unica verso valle e di un sistema di drenaggio costituito da opere trasversali.

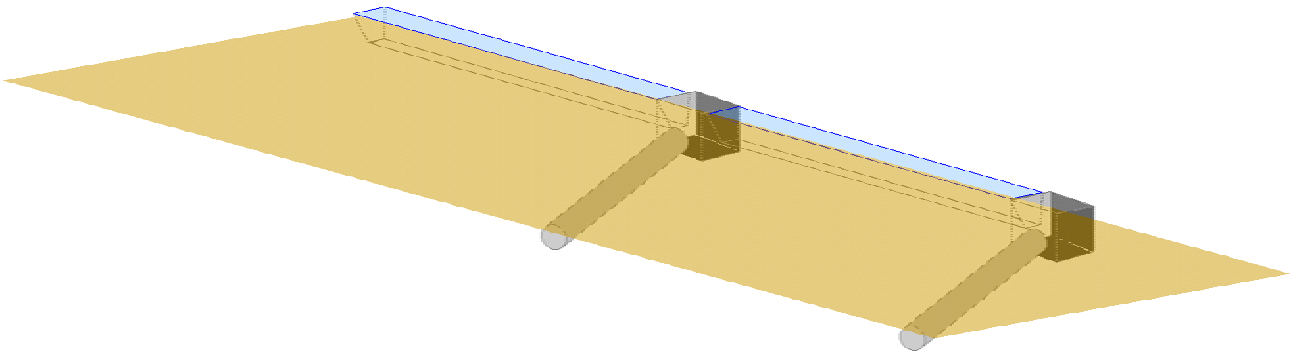


Figura 26: schema di tombinatura

Quest'ultima soluzione, come precedentemente accennato, è vantaggiosa dal punto di vista economico, ma in linea di principio andrebbe utilizzata solo su strade con pendenze modeste e basso volume di traffico (Cook e Hewlett, 1979). Su pendenze elevate e con intensità di traffico superiore a 10÷15 veicoli al giorno, andrebbe invece prevalentemente utilizzato lo schema basato su una pendenza del piano viabile verso monte, con cunette e tombini (Eck e Morgan, 1987).
Vantaggi e svantaggi dei due schemi sono stati messi in evidenza da Johansen et al. (1997) e riportati in Tabella IV, anche se è bene ribadire che lo smaltimento delle acque superficiali sulle strade agro-silvo-pastorali deve essere affrontato utilizzando in maniera integrata opere longitudinali, opere trasversali, sagomatura del piano stradale e tipo di fondo, in un'unica strategia progettuale.

7.2 Opere longitudinali

Questo tipo di opere è in genere associato alla sagomatura della sede stradale con pendenza verso monte (cfr. § 0). Tale schema è quello più adeguato a smaltire l'acqua in versanti a forte pendenza e dove la scarpata di monte intercetta una consistente quota di deflusso sottosuperficiale che, oltre a riversarsi sul piano viabile, mantiene in stato di saturazione il piede del versante, aumentando il rischio di un suo franamento (cfr. Tabella III). Frequentemente questo tipo di opere non viene realizzato per motivi di risparmio in quanto occorre allargare di 0.5÷1.0 m la strada e sostenere maggiori oneri per lo scavo, il materiale e la manodopera; tale risparmio in fase di realizzazione, rischia però di trasformarsi in maggiori spese di manutenzione ordinaria e straordinaria, oltre a ridurre la sicurezza del transito.
Le opere di drenaggio longitudinale devono essere raccordate ai tombini con una frequenza sufficiente ad assicurare il corretto smaltimento delle acque in relazioni alle caratteristiche

Tabella IV: confronto tra canalette e tombinature (da Johansen et al., 1997 modificata)

Tipologia	Canalette superficiali	Tombinature
Effetto sulla transitabilità	Da basso a significativo	Nullo
Erosione potenziale	Piano stradale e versante allo sbocco della canaletta	Piano stradale, cunetta e versante allo sbocco del tombino
Effetto dei detriti	Possono influenzarne l'efficienza riempiendole, ma non vi sono ingressi da intasare	Si possono verificare intasamenti all'imbocco e all'interno delle opere
Affidabilità	Variabile	Buona
Materiale	Possono essere realizzate con materiale in posto e di scarto	Possono utilizzare materiali diversi con resistenza differente; in ordine crescente: legno, cemento, alluminio, ABS, acciaio, polietilene ad alta densità
Manutenzione	Facilità di manutenzione e di riparazione	Manutenzione necessaria e poco agevole
Costo	Economiche	Elevato

climatiche della zona, alle caratteristiche idrologiche del versante ed alle caratteristiche geometriche della strada (cfr. § 7.2.3); è infatti opportuno mantenere i manufatti nelle dimensioni standard per evitare allargamenti eccessivi della strada e per ridurre i costi delle opere.

Il raccordo tra cunetta (o drenaggio) e tombino che sottopassa la strada, avviene per mezzo di un pozzetto d'ispezione e raccordo (cfr. § 7.2.3.4). Frequentemente i tombini vengono sostituiti da canalette trasversali.

Le tipologie possibili sono numerose sia per le cunette, che per i drenaggi sottosuperficiali.

7.2.1 Cunette

Si tratta di canalette a cielo aperto che, da una parte intercettano il deflusso sottosuperficiale dal versante di monte, dall'altra raccolgono il deflusso superficiale prodotto sul piano stradale.

Possono essere semplici incisioni a lato della carreggiata o canalette realizzate con materiale vario. In genere, come precedentemente accennato, si preferisce assegnare dimensioni standard badando a raccordarle ai tombini (o alle canalette) con una frequenza sufficiente ad evitare che il deflusso accumulato ecceda la loro capacità di deflusso. Dal punto di vista idraulico possono essere dimensionate con le consuete relazioni basate sul moto uniforme e la difficoltà maggiore sta nella determinazione della portata da smaltire.

Nel caso in cui le cunette non siano rivestite, esse possono essere erose al fondo e sui lati, soprattutto con pendenze elevate (Figura 27); per evitare questo tipo di problemi sarebbe opportuno mantenere la pendenza media a valori inferiori al 4÷5%, ricorrendo a piccoli salti di fondo (eventualmente stabilizzati, cfr. § 7.2.3.4). In generale, per la facilità con cui possono intasarsi, le cunette andrebbero evitate in situazioni di forte produzione di detrito dal versante (o dalla scarpata) di monte e quando non si preveda la possibilità di effettuare manutenzione periodica.

Le tipologie maggiormente diffuse sono:

Figura 27: erosione della cunetta laterale (da Copstead e Johansen, 1998)

- *Cunette non rivestite* - sono economiche, ma suscettibili di erosione per cui vanno eseguite solamente su tratti con pendenze limitate e su substrati non facilmente erodibili;
- *Cunette in legname e pietrame* - sono resistenti all'erosione, possono essere realizzate sul posto con materiale locale, si inseriscono bene dal punto di vista paesaggistico ed ambientale (si veda in proposito il *Quaderno delle opere tipo di ingegneria naturalistica* della Regione Lombardia, 2000);
- *Cunette semicircolari in acciaio zincato* - leggere, economiche, non erodibili, possono presentare qualche difficoltà d'installazione su terreni irregolari, hanno un certo impatto visivo;
- *Cunette in cement* -, facili da installare ed efficienti, sembrano comunque le meno indicate per l'ambito agro-silvo-pastorale; da evitare nelle zone di maggior interesse ambientale.
- *Cunette in selciato* - sono i resti di opere realizzate nel passato che non vengono quasi più realizzate, ma che resistono mantenendo inalterata la loro efficacia (Figura 29)

Per quanto riguarda il loro dimensionamento, come si è detto è preferibile mantenere le dimensioni standard ed agire sulla frequenza dei tombini (cfr. § 7.2.3); per impedire che la corrente prosegua nel senso della pendenza longitudinale della strada è possibile creare piccoli sbarramenti che facilitano il deflusso verso i tombini.

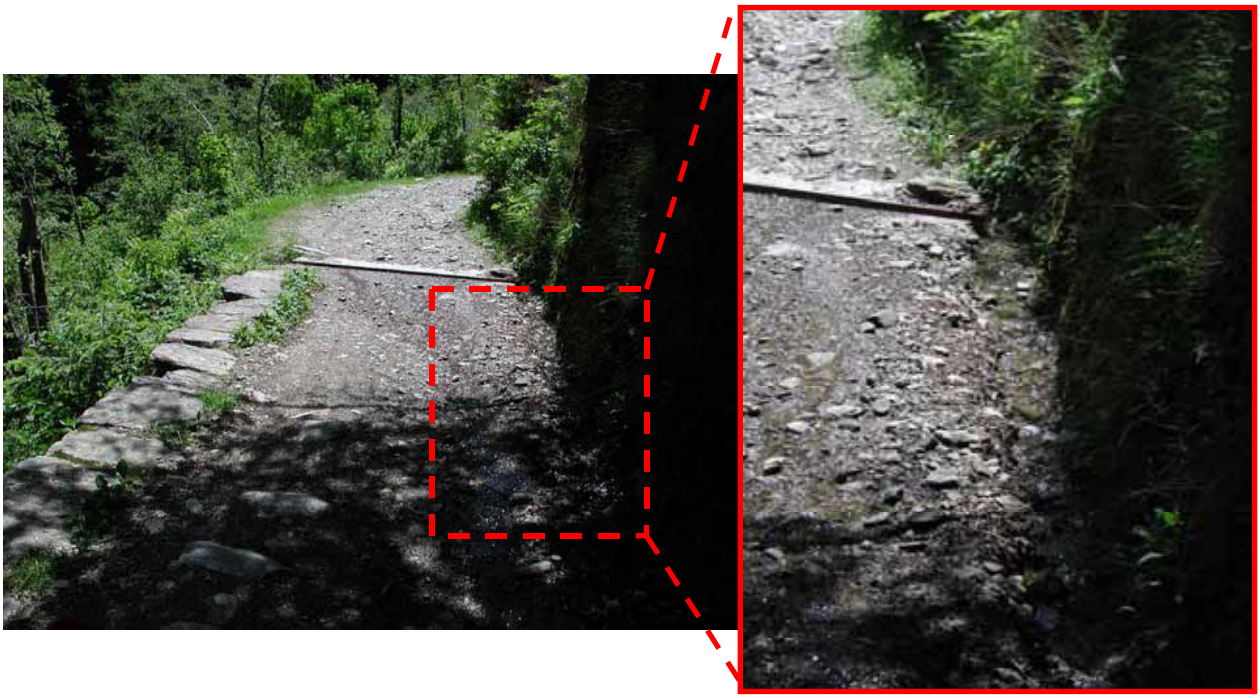


Figura 28: cunetta di monte non rivestita raccordata a canaletta trasversale per lo smaltimento sul versante

Figura 29: cunetta rivestita in selciato

7.2.2 Drenaggi sottosuperficiali

I drenaggi sottosuperficiali possono essere efficacemente utilizzati in combinazione o in alternativa alle cunette. Rispetto a queste hanno il vantaggio di non intasarsi a causa dei detriti provenienti dai dissesti superficiali e dai residui della vegetazione arborea e di non avere problemi di erosione.

Le tipologie più frequenti sono:

- *drenaggi in ghiaia* - si tratta di effettuare uno scavo (in genere 0.5 m per 1.0 m) che viene riempito con uno strato di pietrisco per la metà e poi coperto con terreno di riporto; al fine di ridurre l'intasamento dei meati e prolungarne l'efficienza può essere vantaggioso rivestire lo strato di pietrisco con geotessuto;
- *drenaggi tubolari* - si tratta di aggiungere alla tipologia precedente un dreno tubolare (generalmente in PVC corrugato) che viene posizionato sul fondo dello scavo. Anche in questo caso è vantaggioso rivestire il dreno con geotessuto al fine di ridurre l'intasamento dei fori;
- *drenaggi con fascine* - in linea di principio potrebbero anche essere utilizzati drenaggi con fascine morte; hanno il vantaggio di essere economiche e realizzabili in loco, anche se la loro durata è limitata e presentano problemi d'innesto con i tombini (si veda in proposito il *quaderno delle opere tipo di ingegneria naturalistica* della Regione Lombardia, 2000).

7.2.3 Tombini

L'acqua raccolta dalle cunette e dai drenaggi longitudinali, come precedentemente accennato, deve essere opportunamente convogliata verso il versante di valle o la rete idrografica con una frequenza sufficiente ad evitare che si formino volumi difficilmente gestibili o erosioni al fondo della cunetta. Per ridurre la possibilità d'intasamento è bene collocare all'intersezione tra cunetta (o drenaggio) e tombino un pozzetto ispezionabile; per evitare fenomeni d'erosione localizzata sul versante o nella rete idrografica occorre prevedere all'uscita dei tombini opere di dissipazione (cfr. §7.2.3.4).

7.2.3.1 Materiale

I tombini possono essere di diversa foggia e materiale (Johansen et al., 1997): circolari, rettangolari, in plastica, metallo, cemento, ecc. In genere viene utilizzato il materiale più facilmente reperibile e del minor costo. Un materiale poco usato in Italia, ma di grande interesse per le sue caratteristiche tecniche, è il polietilene ad alta densità (HDPE); Gonzales (1998) riporta per questo tipo di materiale leggero e maneggevole una vita attesa di 75 anni contro i 40 del metallo corrugato e una capacità portante pari a quella del metallo corrugato e del cemento. Per evitare che i tombini subiscano dei danni con il passaggio dei veicoli occorre che essi siano installati correttamente, prevedendo uno strato sovrastante pari al loro diametro nel caso di materiali rigidi (cemento) o al 30 % del diametro nel caso di materiali flessibili (lamiera, materiali plastici).

7.2.3.2 Dimensioni

In generale, per comodità si tende ad utilizzare tombini di dimensione standard ed a farne variare la spaziatura lungo il tracciato, in modo da non avere attraversamenti troppo frequenti né portate eccessive nelle cunette che potrebbero intasarsi e riversare l'acqua sul piano stradale. Indipendentemente dalla portata che vi deve transitare, sarebbe opportuno utilizzare manufatti con diametro di almeno 1 m per ridurre la possibilità d'intasamenti e consentire eventuali ispezioni; in ogni caso non si dovrebbero utilizzare dimensioni inferiori a 0.45 m. In genere, infatti, il fattore che deve guidare la scelta delle dimensioni del tombino non è quello strettamente idraulico, quanto quello legato al possibile intasamento derivante dal trasporto di detrito o di materiale flottante che può cambiare proprio in relazione alla realizzazione della strada e allo sfruttamento del bosco. Per facilitare lo smaltimento della portata liquida e soprattutto solida occorre che i tombini abbiano una pendenza superiore al 2%.

7.2.3.3 Spaziatura

La spaziatura dei tombini, come illustrato nei precedenti paragrafi, dipende dalla portata prodotta dal piano stradale e dalla scarpata di monte, nonché dalla capacità di deflusso della cunetta (o del drenaggio) ed è pertanto di difficile calcolo; nel caso di cunette non rivestite la spaziatura tra i tombini può essere assunta pari a quella che si avrebbe per le canalette trasversali. Sulla base di questo principio Johansen et al. (1997) suggeriscono di fare riferimento ai valori proposti da Packer e Christensen (1964) riportati in Tabella VII.

7.2.3.4 Opere complementari

Nell'ambito delle opere complementari da utilizzare nello schema costruttivo della tombinatura, rientrano semplici accorgimenti che però esercitano un ruolo fondamentale per garantire l'efficienza delle opere di drenaggio.

Una delle opere più importanti è costituita dalla protezione dei punti d'ingresso e d'uscita dei tombini, che costituiscono dei punti critici: il primo, infatti, può essere soggetto ad intasamenti che ne pregiudicano l'efficienza, la seconda può provocare erosione sulla scarpata di valle o sul versante. Per evitare questo tipo di problemi è opportuno prevedere piccole opere di mitigazione.

Gli ingressi ai tombini, che costituiscono il raccordo con le cunette ed i drenaggi, dovrebbero essere dotati di pozzetti ispezionabili per prevenirne l'intasamento e anche per ridurre la quantità di sedimento che perviene alla rete di drenaggio; le stesse opere possono anche essere utilizzate per realizzare siti di ricarica e di dispersione del deflusso eventualmente necessari per riequilibrare la dinamica idrologica naturale. Queste opere vanno dal semplice rialzo dell'ingresso del tombino, ai pozzetti in legname, sassi o altro materiale, a veri e propri bacini di decantazione ottenuti con sbarramenti (Figura 30).

Per quanto riguarda la stabilizzazione delle canalette laterali è possibile intervenire con opere particolarmente semplici ma efficaci, in grado di fissare il fondo della canaletta stessa; a tale scopo possono essere utilizzati efficacemente pietre di grosse dimensioni e tondame, fissati alle sponde ed al fondo.

Per quanto riguarda le opere di protezione degli sbocchi sulle scarpate di valle e sui versanti si veda il § 7.3.1.3.

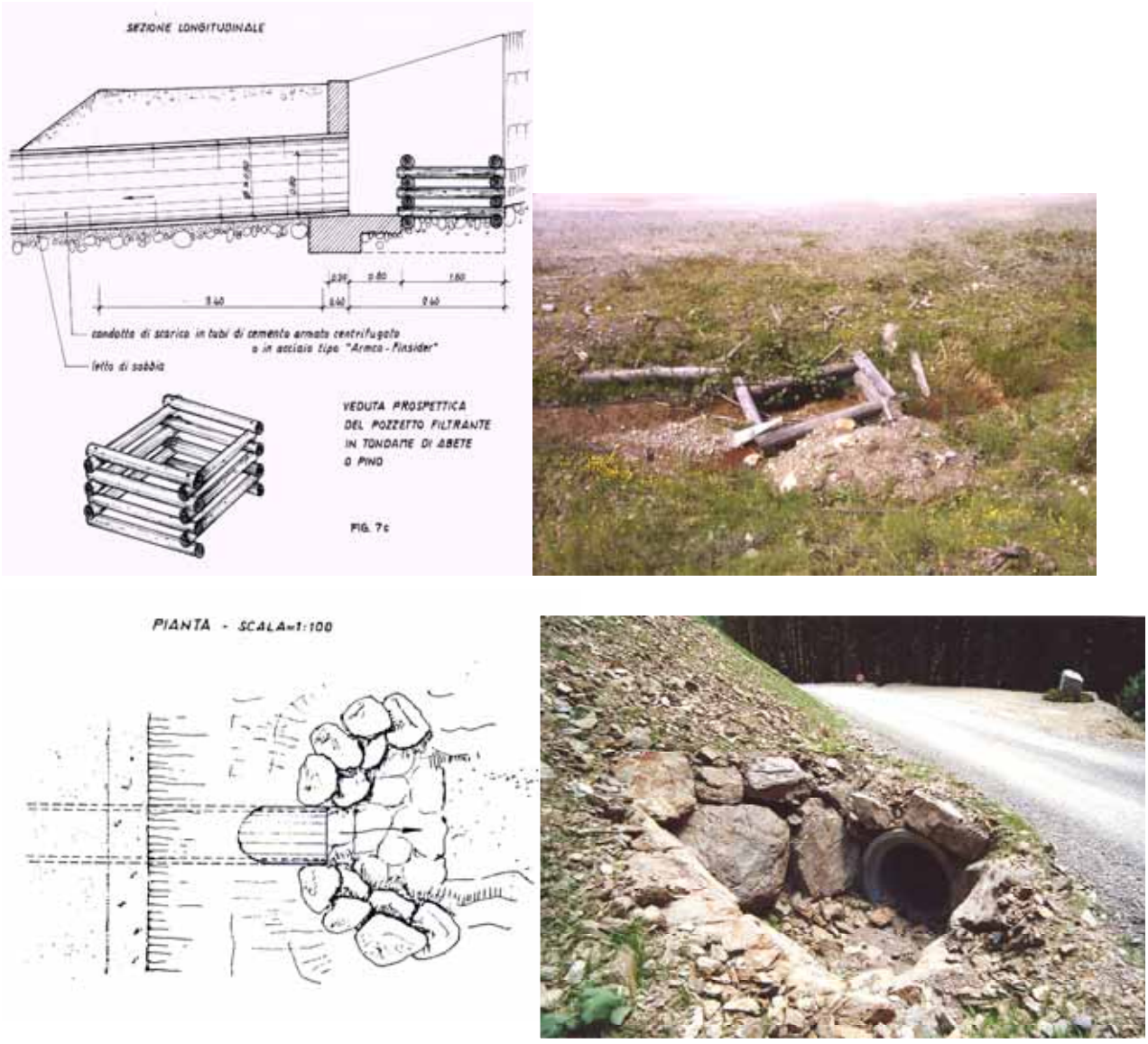


Figura 30: pozzetti in legname e in massi (Bortoli, 2001)

In generale, il deflusso proveniente dai tombini (ma anche delle canalette e dei deflettori) non dovrebbe essere convogliato direttamente nei corsi d'acqua, ma dovrebbe essere fatto transitare attraverso una zona cuscinetto ("buffer zone") possibilmente con morfologia convessa, poco erodibile e stabile, in grado di assorbire il deflusso e ritardare l'arrivo del sedimento in esso trasportato, mitigando così il conseguente aumento dei colmi di piena e del trasporto solido.

7.3 Opere trasversali (canalette o deviatori o deflettori)

Le opere trasversali a cielo aperto assolvono essenzialmente la funzione di limitare la lunghezza del percorso dell'acqua sul piano stradale convogliandola sul versante di valle o negli impluvi. Esse, interrompendo lo scorrimento dell'acqua, ne riducono il potere erosivo, limitano la formazione di solchi e l'approfondimento delle tracce lasciate dalle ruote dei veicoli.

Sebbene siano note anche come deviatori o deflettori, nel presente documento vengono chiamate canalette indipendentemente dalla loro tipologia.

Questo tipo di manufatti, che in genere sono associati alla sagomatura della sede stradale con pendenza verso valle, ma che possono essere anche utilizzate al posto dei tombini che sottopassano la strada nel caso di piano con pendenza verso monte, possono essere realizzati in diversi modi per tipologia e materiale utilizzato. Di seguito, dopo aver illustrato gli elementi progettuali per il dimensionamento della rete di drenaggio, vengono descritte le diverse tipologie di canaletta reperibili in letteratura, comprese quelle meno utilizzate nell'ambiente italiano che possono costituire un interessante riferimento per situazioni particolari.

7.3.1 Elementi progettuali

L'obiettivo che un sistema di smaltimento delle acque superficiali deve raggiungere, come precedentemente accennato, è quello di evitare la concentrazione del deflusso sulla sede stradale e sulla scarpata di valle o verso quella di monte, prevenendone l'erosione e l'instabilizzazione (Eck and Morgan 1987). Tale obiettivo può essere raggiunto con il concorso di diversi elementi (cfr. capitolo 4), tra i quali rientrano le canalette.

In generale, i criteri che dovrebbero guidare la realizzazione delle opere sono i medesimi che controllano i fenomeni di erosione idrica, tenendo però conto delle specifiche esigenze legate alla transitabilità. I principali fattori che influenzano l'efficienza del sistema di smaltimento delle acque, di conseguenza, sono:

- caratteristiche delle precipitazioni intense;
- caratteristiche della sede stradale (erodibilità del substrato e pendenza);
- lunghezza del deflusso superficiale (distanza delle canalette e tipologia del piano viabile);
- caratteristiche delle scarpate (stabilità del substrato e pendenza);
- intensità e tipologia di traffico;
- frequenza di manutenzione.

Tali fattori, difficilmente traducibili in schemi interpretativi e modellistici rigorosi, trovano riscontro in termini progettuali e realizzativi nelle seguenti caratteristiche: distanza tra i singoli elementi, pendenza, lunghezza e orientamento, protezione dello sbocco sulla scarpata, sul versante o nella rete.

7.3.1.1 Spaziatura

La distanza tra le canalette è sicuramente l'elemento di maggior interersse progettuale. In generale, essa deve garantire lo smaltimento del deflusso superficiale prodotto sulla sede stradale e di quello sottosuperficiale intercettato, limitare l'erosione del fondo stesso ed evitare la formazioni di solchi, ma al contempo garantire una qualità di transito ragionevole.

Come precedentemente accennato, i modelli relativi ai processi idrologici ed erosivi (anche quelli più complessi) non sono in grado di fornire risultati utilizzabili nella realtà operativa; sono stati effettuati alcuni tentativi in tale senso, ma con scarso successo ad eccezione del modello X-DRAIN sviluppato dal Servizio Foreste dell'USDA (Elliot et al., 1998).

Al momento, quindi, non rimane che basarsi sulle esperienze fatte dai ricercatori in diverse situazioni. Per l'arco alpino sono disponibili i valori riportati da Hafner (1971, cit. Mazzalai, 1987) che fornisce valori compresi in una forcella che considera situazioni favorevoli e sfavorevoli in termini di produzione del deflusso e di erosività della pioggia (Tabella V). Numerose esperienze sono state effettuate negli U.S.A. per una grande varietà di condizioni climatiche e di substrato ed hanno prodotto numerose linee guida. Nonostante la diversità dei valori è interessante notare che la maggior parte degli Autori non considera pendenze della strada superiori al 15÷16 % e che in tale caso la spaziatura è di circa 10 metri nelle condizioni peggiori e di alcune decine di metri in quelle migliori (Tabella VI); con pendenza inferiore al 10%, invece, la spaziatura delle canalette risulta essere da alcune decine di metri fino ad oltre 100 metri.

Tabella V: spaziatura dei drenaggi trasversali (Hafner, 1971, cit. Mazzalai, 1987)

	Situazione favorevole[3]	**Situazione sfavorevole[4]**
Pendenza [%]	**Distanza [m]**	**Distanza [m]**
5	72	
6	56	
7	48	
8	44	30
9	40	28
10	36	26
11	34	24
12	32	22
13	30	20
14	28	18
15	27	16
16	26	14
17	24	13
18	23	
19	22	
20	21	
21	20	
22	19	

[3] copertura a bosco con precipitazioni annue inferiori a 1300 mm e piogge intense rare.

[4] precipitazioni annue superiori a 1300 mm e notevoli piogge intense.

Tra le linee guida reperibili in letteratura si ritiene particolarmente interessante quella proposta da Copstead et al. (1998), basata sul lavoro di Packer e Christensen (1964). Le curve che derivano da tale metodologia per le diverse classi di materiale, infatti, comprendono i valori proposti da diversi Autori per ambienti differenti (Figura 31) e pertanto sembra essere di carattere sufficientemente generale. La metodologia permette di calcolare la distanza tra le canalette in funzione di sei classi di substrato in termini di classi granulometriche U.S.C.S. (si veda l'Appendice 2) e di alcuni fattori correttivi che tengono conto delle situazioni specifiche dei siti (posizione sul versante, pendenza ed esposizione del versante) rispetto alla situazione standard riportata in Tabella VII (riferita ad un tratto di strada nella porzione sommitale di un versante esposto a nord con pendenza dell'80%).

Tabella VI: valori di spaziatura (m) per strade con fondo naturale pubblicati negli USA (da Copstead et al., 1998)

Pendenza (%)	**2÷5**	**5÷10**	**10÷15**	**15÷20**
Haupt (1959)	41÷76	24÷41	18÷24	14÷18
Haussman e Pruett (1973)	95÷150	60÷95	35÷60	
Packer (1967)	23÷51	17÷44	11÷39	
Rothwell (1978)	46	31÷61	15÷46	
Swift (1985)	67÷85	37÷67	6÷37	

Tabella VII: massima distanza[a] tra opere trasversali basata sui gruppi di erodibilità dei suoli del USCS[b] (da Copstead et al., 1998)

Pendenza strada	**Gruppo 1 GW, GP, inghiamento**	**Gruppo 2 GM, GC**	**Gruppo 3 CH, CL**	**Gruppo 4 MH, SC, SM**	**Gruppo 5 e 6 SW, SP, ML**
%			metri		
2	120	97	75	52	29
4	103	84	65	45	26
6	88	71	55	39	23
8	74	60	47	33	20
10	61	50	39	28	17
12	50	41	32	23 [c]	14 [c]
14	42 [c]	34 [c]	26 [c]	19 [c]	11 [c]

[a] cui vanno applicati i seguenti coefficienti di riduzione secondo quanto riportato da Packer and Christensen (1964):

ridurre la distanza di:	se la strada si trova:
5 metri	nel terzo mediano del versante
11 metri	nel terzo di base del versante
3 metri	con esposizione est o ovest
6 metri	con esposizione sud
1.5 m	ogni 10% in meno di pendenza del versante rispetto al valore standard dell'80%

Se dopo aver applicato i coefficienti di riduzione la distanza è inferiore a 20 m, tenere tale valore come distanza tra le opere e utilizzare tecniche protettive quali inghiaiamento, inerbimento, banchine, cunette.

[b] adattati secondo Gray e Leiser. (per la classificazione USCS si veda l'Appendice 4)

[c] non raccomandati per gli avvallamenti in quanto possono richiedere pendenza di approccio superiore al 15 %

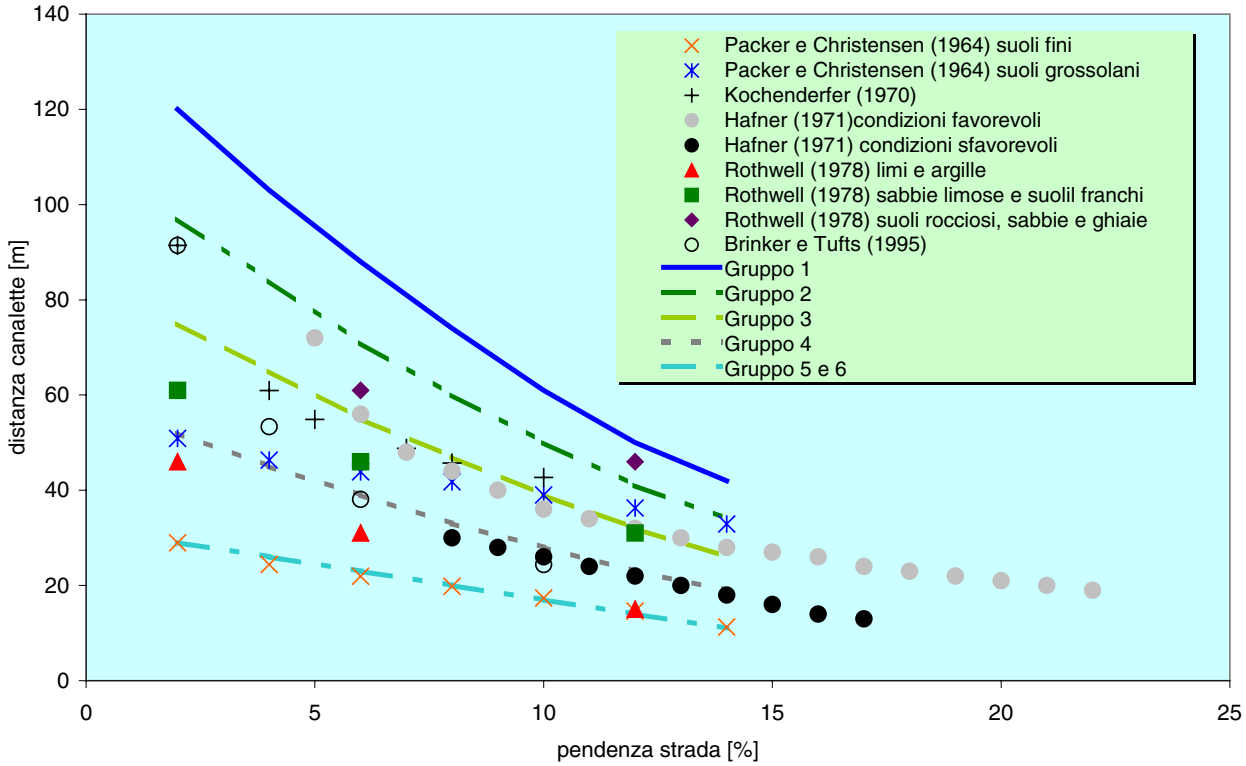


Figura 31: confronto tra la spaziatura dei drenaggi trasversali secondo la metodologia di Copstead et al. (1998) ed i valori proposti da diversi Autori

7.3.1.2 Lunghezza, orientamento e pendenza trasversale

La lunghezza delle canalette deve essere tale da superare di circa 10 cm il piano stradale verso valle e consentire un ammorsamento nella scarpata di monte al fine di evitare l'aggiramento della canaletta stessa (Figura 32). Nel calcolo della lunghezza occorre tenere conto dell'inclinazione rispetto all'asse stradale; una semplice relazione per valutare la lunghezza complessiva della canaletta (L) è la seguente:

$$L = \frac{l}{sen\alpha} + t$$

Figura 32: la canaletta deve essere ammorsata in quella di monte per evitare l'aggiramento

con *l* larghezza strada, α inclinazione della canaletta rispetto alla perpendicolare dell'asse stradale, *t* tolleranza d'installazione.

L'orientamento dovrebbe essere di 25÷45° rispetto alla perpendicolare dell'asse stradale (ottimale 30°) per evitare che le ruote gravino contemporaneamente sul manufatto e per conferire una pendenza trasversale alla canaletta (Figura 33).

La pendenza trasversale delle canalette deve garantire lo smaltimento del deflusso prodotto dal tratto di strada sotteso ed evitare la deposizione almeno del materiale più fine. A tale scopo la pendenza non dovrebbe essere inferiore al 3÷4%. La posa delle canalette deve essere accurata, soprattutto in terreni argillosi e cedevoli quando sono umidi, e utilizzare un letto costituito da materiale sciolto.

7.3.1.3 Protezione sbocco

Hanno lo scopo di dissipare l'energia cinetica del deflusso ed evitare pericolose erosioni localizzate. Tale risultato può essere efficacemente ottenuto mediante soluzioni più o meno semplici, dall'ammucchiare delle pietre di diametro adeguato (almeno 7-8 cm) a costituire un blocco delle dimensioni minime di 60 per 20 cm, fino alla realizzazione di vere e proprie opere in pietrame a secco o con malta, in gabbioni, ecc.

7.3.2 Manutenzione

La manutenzione delle opere di drenaggio è fondamentale per garantire la loro funzionalità ed andrebbe eseguita regolarmente e dopo gli eventi più intensi (Figura 34). Stabilire a priori l'intervallo tra una manutenzione e la successiva è estremamente difficile, in quanto le condizioni che possono portare all'intasamento delle opere sono molteplici e variabili anche all'interno della medesima strada. Un programma di minima dovrebbe prevedere almeno un'ispezione annuale, dopo il periodo d'innevamento al fine di verificare lo stato delle opere e della strada nel suo complesso; tale cadenza consentirebbe inoltre di verificare l'eventuale presenza di tratti che richiedono

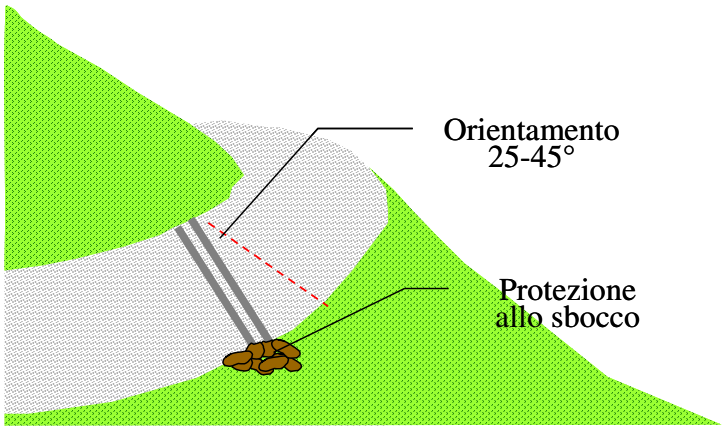


Figura 33: orientamento e protezione delle canalette superficiali (da Copstead et al., 1998)

Figura 34: manutenzione di una canaletta negli USA (da Copstead et al., 1998)

cadenze differenti.

Si tenga conto che il costo di una verifica ed una manutenzione periodica dei manufatti idraulici è sicuramente inferiore al costo di una risagomatura del fondo, senza contare che la maggior parte dei dissesti di versante in ambito forestale proviene proprio dal mancato funzionamento di queste opere.

7.3.3 Tipologie

Le tipologie di canalette sono innumerevoli, frutto dell'adattamento alle diverse esigenze ambientali ed operative, ed alle predilezioni degli operatori.

Vengono quindi descritte le principali categorie di canalette che possono essere utilizzate per lo smaltimento delle acque di scorrimento dal piano stradale, senza la pretesa di esaurire tutte le possibili varianti.

7.3.3.1 Canaletta in legno assemblata a sezione rettangolare

Si tratta delle classiche canalette che si trovano sulla maggior parte delle strade agro-silvo-pastorali, si ottengono assemblando due o tre assoni (Figura 35) con sezione 10÷12 cm (4÷5 cm di spessore l'eventuale fondo), uniti da 3÷4 ferri reggi spinta (o distanziatori); questi sarebbe bene fossero ad omega rovesciata e non a croce in quanto sarebbero di ostacolo alle auspicate operazioni di pulizia. Per il loro ingombro e peso (65÷70 kg) richiedono almeno due operai per l'installazione, ma possono anche essere realizzate sul posto. La durata prevista è di 10÷15 anni, ma spesso non sono più funzionali dopo pochi anni per il passaggio dei veicoli o per l'interrimento.

7.3.3.2 Canaletta in metallo (Bortoli, 1982; Gonzales, 1998)

Le canalette in metallo, di diversa foggia (Figura 36), stanno diventando sempre più diffuse per la comodità di reperimento e la buona capacità di smaltimento delle acque; a causa delle dimensioni standard difficilmente adattabili in posto, della deformabilità quando sottoposte a carichi e del costo (se si esclude l'utilizzo di guard-rail dimessi), tuttavia, non hanno dato risultati soddisfacenti.

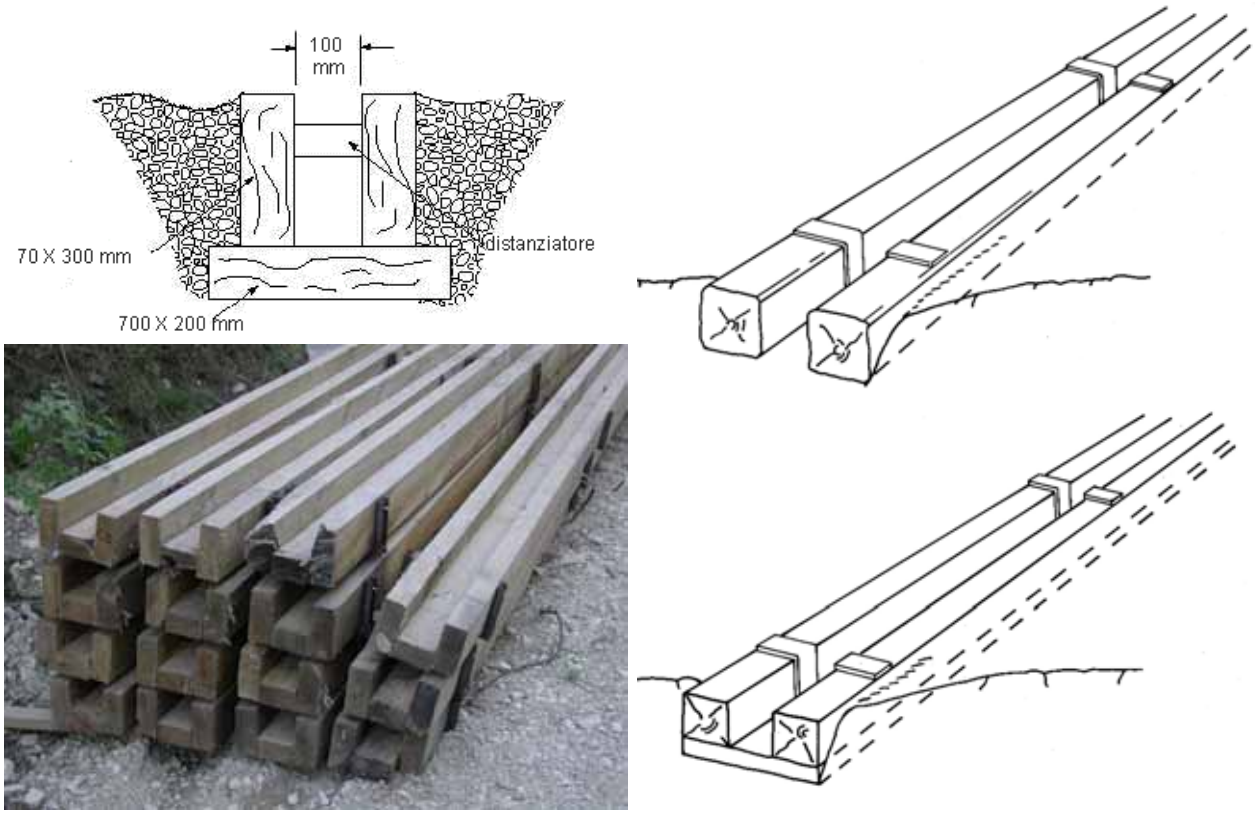


Figura 35: esempi di canalette in legname (ridisegnate da Copstead et al., 1998 e Bortoli, 1982)

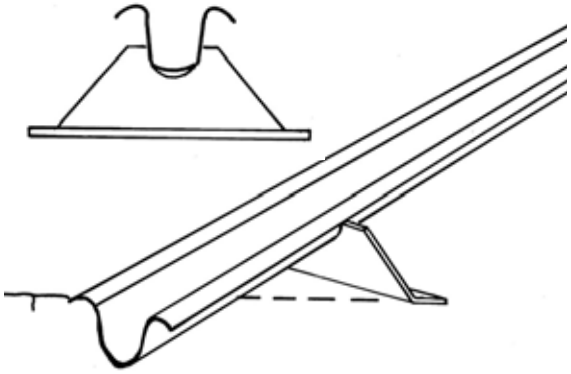
Per garantire un adeguato ancoraggio al terreno occorre saldare delle piastre d'acciaio (larghezza 100 mm, spessore almeno 6.4 mm) sulla parte inferiore e nel caso si utilizzi materiale non galvanizzato occorre rivestirle con adeguata protezione dalla ruggine; nel collocarle, infine, bisogna prestare attenzione a mantenere la sommità della canaletta almeno 75 mm sotto la superficie del piano stradale, che viene poi sagomata per facilitare il deflusso verso la canaletta (Figura 36b).

È anche possibile utilizzare materiale di scarto quali due spezzoni di rotaia collocati parallelamente alla distanza di circa 10 cm, su di un letto di pietra (Figura 36c), oppure comuni travi a doppia T.

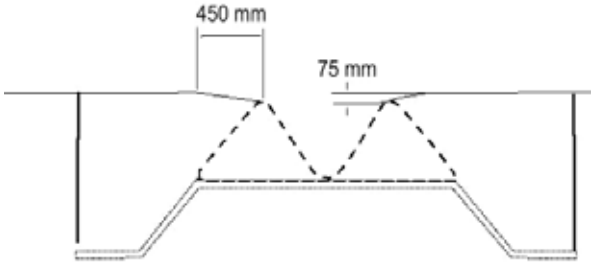
7.3.3.3 Canalette in tronchetti

Sono canalette economiche, realizzate con materiale reperito in loco e che possono assolvere una buona funzione soprattutto in tracciati poco frequentati, possono essere realizzate fissando due tronchi al terreno o fissando tre o più tronchetti, distanziati di circa 10 cm ad una tavola interrata (*Figura 37*a, b).

a)



b)



c)

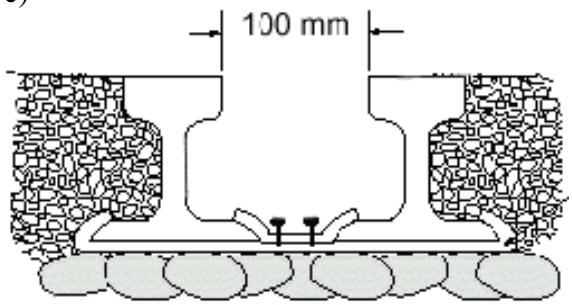


Figura 36: canalette in metallo (Ridisegnate da Bortoli, 1982 e da Copstead et al., 1998)

a)

b)

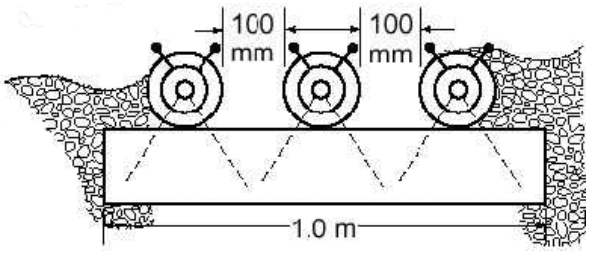


Figura 37: canalette in tronchetti (da Bortoli, 2001 e Copstead et al., 1998)

7.3.3.4 Canalette in legname e fondo cementizio (Eterovich, 2003)

È possibile combinare efficacemente l'utilizzo delle tavole in legname con cemento, assemblando due tavole in legno di larice o pino su di un cassonetto di sottofondo in malta cementizia; le tavole sono unite tra loro con ferri a U dal basso.

La soluzione risulta sufficientemente robusta ed al tempo stesso flessibile e di semplice realizzazione in posto (Figura 38).

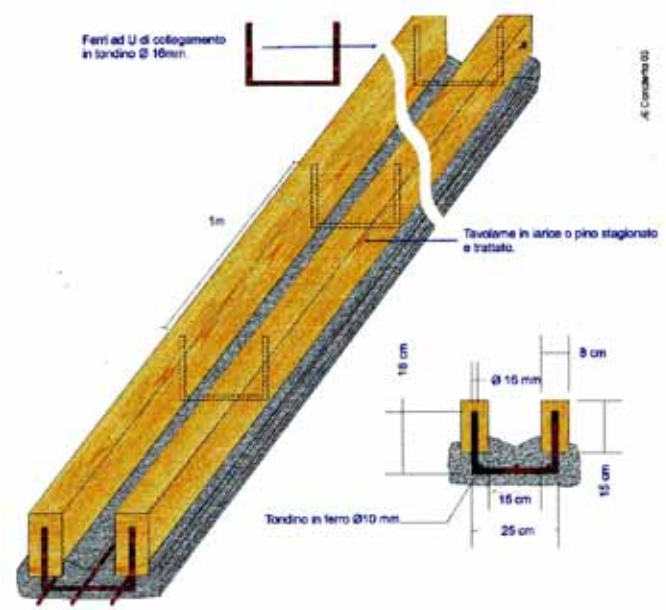


Figura 38:canaletta mista legname e malta cementizia (Eterovich, 2003)

7.3.3.5 Canalette in calcestruzzo prefabbricate (Bortoli, 1982; Gonzales, 1998)

Esistono molti tipi di canalette prefabbricate in calcestruzzo, di diversa tipologia e sezione (rettangolare, trapezia, semicircolare), a luce completamente libera o ricoperte da griglie. Le tipologie che meglio si adattano sono quelle armate e con bordi arrotondati, meno suscettibili di rotture al passaggio degli automezzi, con griglie fisse o asportabili per facilitarne la manutenzione. In generale, è bene collocare questo tipo di canalette (piuttosto rigide) su un letto di ghiaia o di calcestruzzo anche debolmente armato (ad esempio con rete d'acciaio elettrosaldata) per evitare rotture e scalzamenti, soprattutto in terreni non completamente consolidati. Dato l'elevato costo, difficilmente vengono realizzate sulla viabilità agro-silvo-pastorale.

Un'interessante variante è data da una canaletta realizzata in monoblocco di calcestruzzo debolmente armato, a sezione rettangolare al cui interno vengono fissate putrelle su cui è possibile appoggiare un travetto in legno dotato di distanziatori, in modo da formare due fessure in grado di smaltire le acque ma ridurre la possibilità di intasamento e rendere più confortevole il transito (Figura 40). Un'altra variante molto usata in Trentino (Bortoli, 1982) è costituita da una canaletta in elementi di calcestruzzo prefabbricati, della lunghezza di circa 30 cm, che vengono assemblati a secco sul posto mediante opportuni incastri *maschio-femmina* (Figura 39a). Proprio lo speciale tipo di incastro che consente agli elementi di traslare sul piano verticale, ma non su quello orizzontale, rende questo tipo di canalette adattabile alla morfologia della strada, sia in sede di impianto, che successivamente in caso di cedimenti del terreno; inoltre, la modularità consente di adattare la lunghezza della canaletta alla larghezza della sede stradale e di facilitare la loro posa in opera e la manutenzione. La copertura della canaletta può anche essere realizzata con tronchetti appoggiati su supporti presenti sulle spalle della canaletta in calcestruzzo, al passaggio di detrito che eccede la capacità di smaltimento della canaletta, i tronchetti vengono sollevati ed asportati dal detrito stesso (Figura 39b); tale soluzione è idonea anche per l'attraversamento d'impluvi di modeste dimensioni.

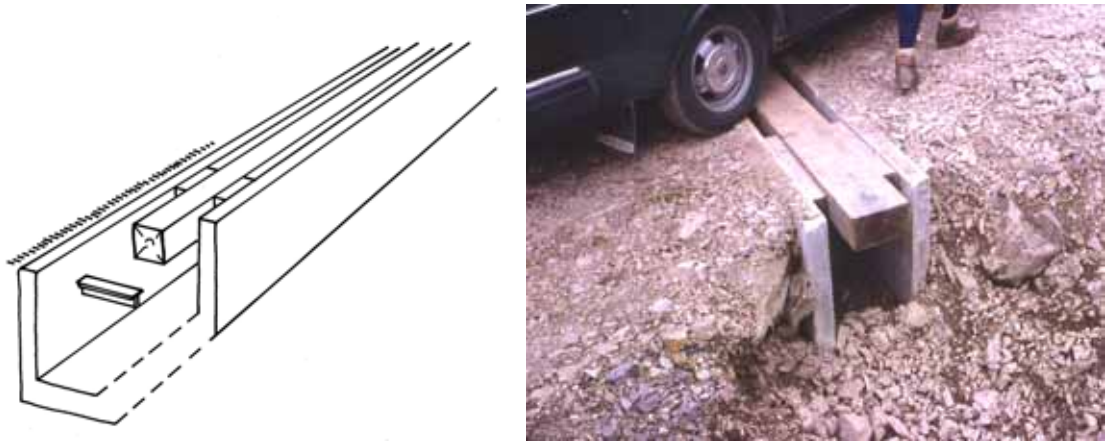
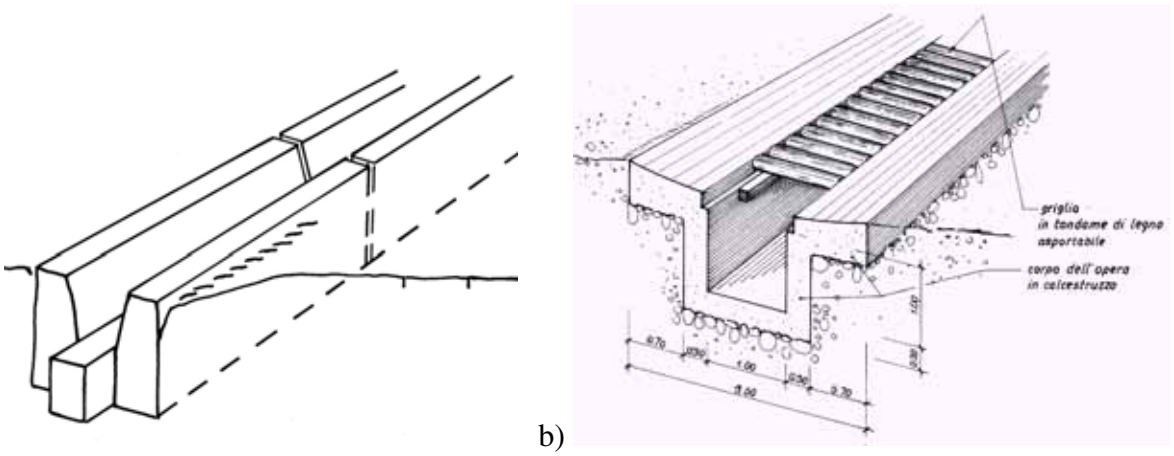


Figura 1: canaletta prefabbricata in calcestruzzo con travetto (da Bortoli, 1982)



a) b)

Figura 2: canaletta prefabbricata in calcestruzzo ad incastro (a) e con griglia in tronchetti (b) (da Bortoli, 1982, 2001)

7.3.3.6 Canaletta a cordamolla

Si tratta di canalette a sezione semicircolare realizzate su sottofondo di calcestruzzo (meglio se armato) con o senza pietrame annegato (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**). Sono efficaci, ma costose e poco gradite al transito. In genere è una soluzione che viene riservata alla realizzazione di veri e propri guadi

7.3.3.7 Avvallamenti

Si tratta di opere che vengono generalmente riservate agli attraversamenti degli impluvi maggiori, ma che essendo drenaggi trasversali molto efficaci dovrebbero ricevere una maggiore attenzione da parte degli operatori anche per la gestione della circolazione idrica sul piano stradale.

L'opera in sé è molto semplice (anche se richiede una certa cura nella realizzazione). Si tratta di realizzare un piccolo avvallamento inclinato di 90÷120° rispetto all'asse stradale (**Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**); la

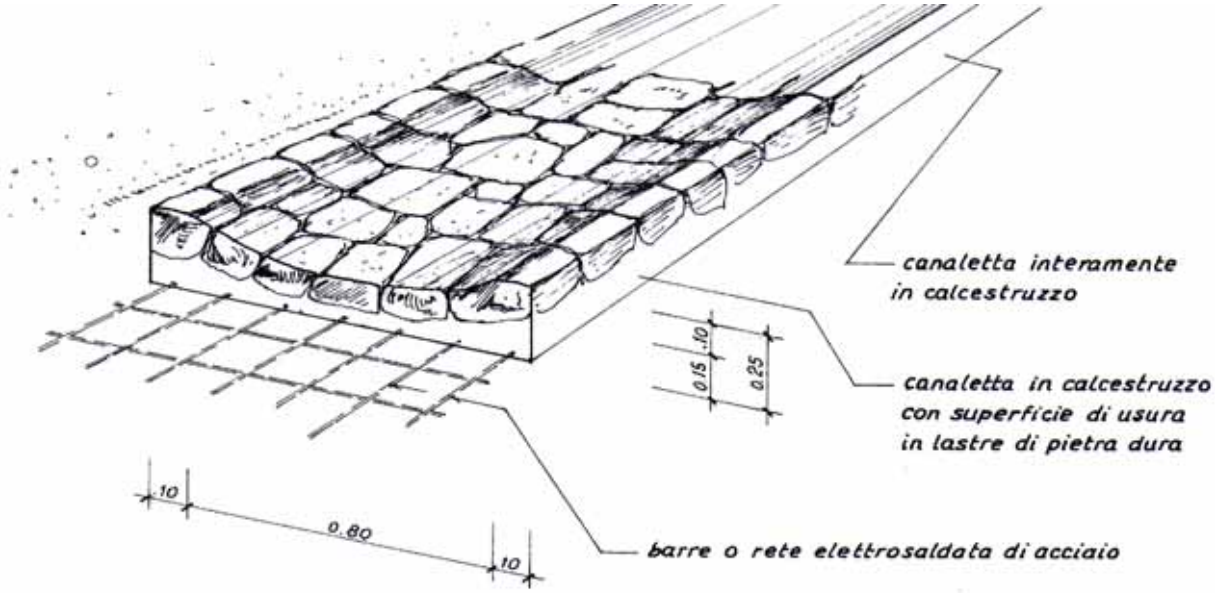


Figura 41: canaletta a cordamolla (da Bortoli, 1982)

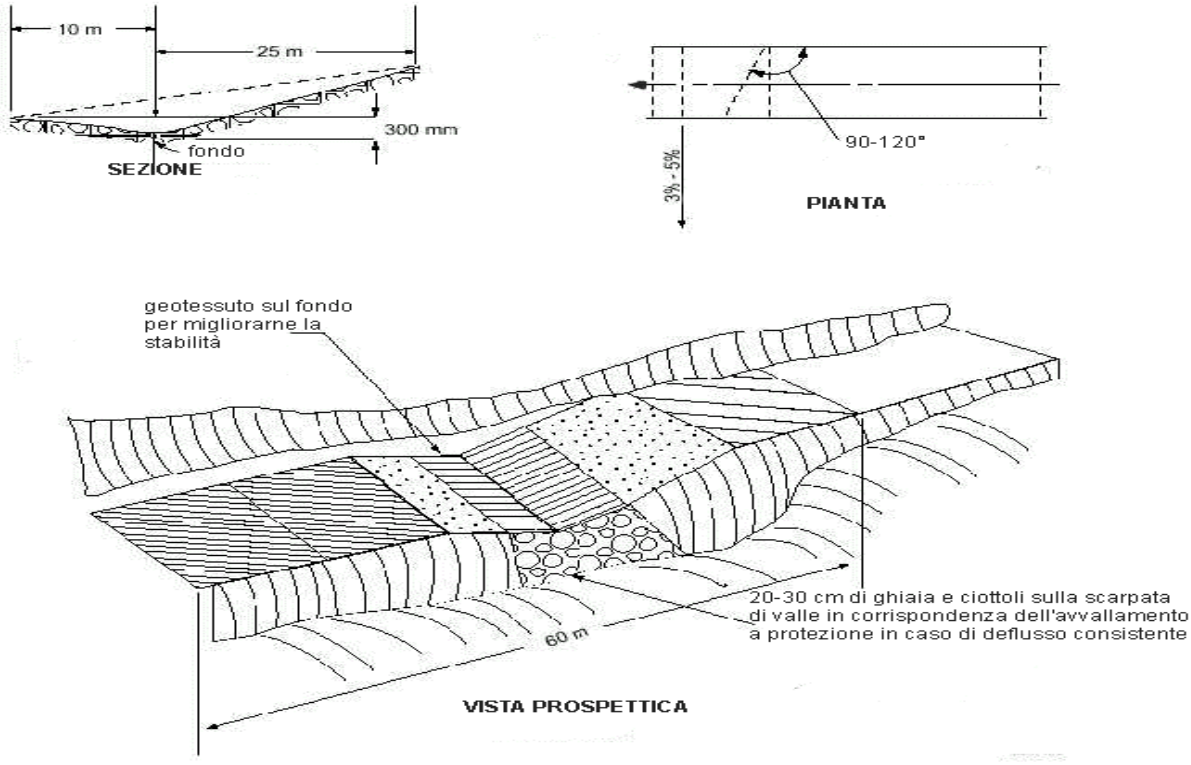


Figura 42: caratteristiche di un avallamento (dip) (da Copstead et al., 1998)

variazione di pendenza verso valle rispetto a quella della strada è di circa il 3÷5 %, in modo da realizzare un avvallamento di circa 30 cm in 10 m, mentre il raccordo verso monte deve avvenire in circa 25 m.

In corrispondenza dell'avvallamento è opportuno utilizzare un geotessuto tra substrato naturale e ricarica per migliorare le caratteristiche di portanza e di drenaggio; sulla scarpata di valle in

corrispondenza dell'avvallamento, inoltre, è opportuno posizionare uno strato di 20÷30 cm di pietrame per proteggerla dall'erosione dovuta al deflusso convogliato.

Il medesimo principio può anche essere realizzato con terreno naturale stabilizzato con leganti di tipo sintetico (Figura 43). In questo caso negli USA sono state proposte le seguenti misure standard: nel caso di canalette poco profonde rialzo (A) di 20-30 cm e lunghezza dell'opera (B) di 1.8-3.6 m; nel caso di opere più profonde rialzo (A) di 60-75 cm e lunghezza dell'opera (B) di 1.8-3.0 m

Come detto, gli avallamenti sono opere efficaci per smaltire il deflusso superficiale che si forma sul piano viabile, ma non sono consigliati su pendenze superiori al 10%, in quanto per evitare che il deflusso sul piano viabile s'indirizzi verso valle, occorrerebbero profondità eccessive. Per gli stessi motivi non sono adatte a sostituire i tombotti per lo smaltimento del deflusso raccolto nelle cunette (se non per piccoli volumi) e per gli attraversamenti.

7.3.3.8 Dossi

I dossi sono un'opera concettualmente simili agli avvallamenti, ma di più semplice realizzazione e utilizzabili anche su pendenze elevate, dove questi risultano inadeguati o irrealizzabili, e sulle piste di esbosco ad uso temporaneo.

Possono essere realizzati molto semplicemente con terreno naturale, eventualmente stabilizzato con leganti sintetici o fissando del tondame con paletti (diametro 8÷15 cm) per tutta la larghezza della strada (Figura 44); in questo caso si tratta

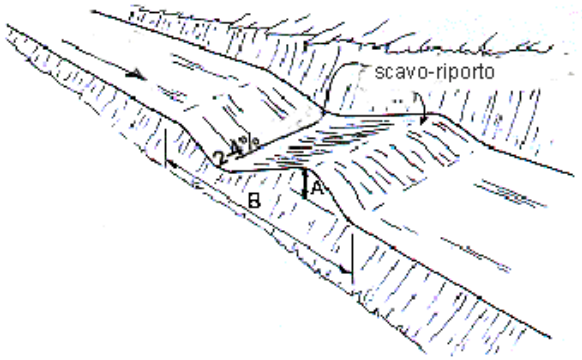


Figura 43: avvallamento in terra (da USDA, 1998)

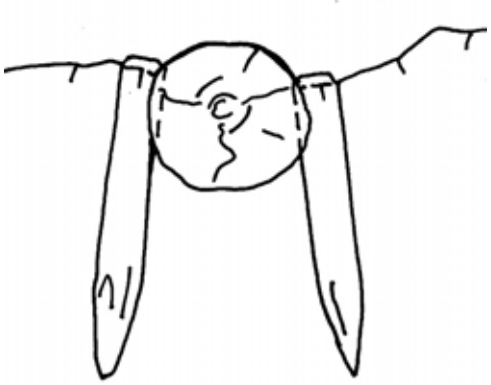


Figura 44: dosso realizzato con tondame

di soluzioni molto economiche, in grado di fissare efficacemente il fondo, ma provvisorie, adeguate per piste di esbosco temporanee con pendenze non superiori al 17 % (Bortoli, 1982).
Un'interessante elaborazione del dosso è stato proposto da Gonzales (1998). Si tratta di una serie di piccoli dossi permanenti e ravvicinati, simili alle bande di rallentamento utilizzate sulle strade ordinarie. Poiché non è ancora stato sperimentato il dimensionamento di questo sistema è affidato alla sensibilità del progettista in relazione alle caratteristiche locali.

7.3.3.9 Deflettore in gomma (Gonzales, 1998)

Si tratta di una soluzione proposta recentemente negli U.S.A. per tentare di coniugare l'efficienza del sistema di drenaggio con la qualità del transito. Si tratta di fissare un elemento in gomma una trave interrata, lasciando in superficie un'estremità libera di circa 5÷10 cm (Figura 45); normalmente la parte libera costituisce un ostacolo allo scorrimento dell'acqua che devia verso il versante di valle o la canaletta di monte, mentre al passaggio dei mezzi questa si flette non ostacolando il transito.
L'installazione è piuttosto onerosa, in quanto occorre scavare una trincea di almeno 90 cm, profonda almeno 30 cm, in modo da lasciare emergere dal piano stradale la fascia per almeno 5÷10 cm; è però possibile utilizzare materiale di scarto (es. elementi dei nastri trasportatori). È bene segnalare la presenza della fascia con paline o altri segnali per non rovinarla durante eventuali operazioni di manutenzione.

7.3.4 Scelta della tipologia di opera

La tipologia di canaletta scelta, tra le diverse possibili, deve riuscire a soddisfare i molteplici aspetti legati alla transitabilità, all'erosione e non ultimi all'effettiva realizzabilità ed al costo.
I fattori da considerare nella scelta sono:

- *Caratteristiche del fondo* - determinano la possibilità di realizzare cunette o dossi non rivestiti e la tendenza all'interrimento dei manufatti;
- *Clima*, intensità - durata e forma delle precipitazioni possono influenzare la quantità del deflusso da smaltire, sia liquido che solido;
- *Pendenza* - su pendenze elevate alcune tipologie di canalette non sono praticabili o convenienti (ad esempio avvallamenti, cunette in materiale naturale);
- *Tipo di utilizzo* - su strade ad elevata intensità di traffico o utilizzate da mezzi pesanti non è consigliabile utilizzare cunette e dossi, o manufatti facilmente deteriorabili come quelli in legname; è inoltre opportuno in questi casi curare particolarmente la messa in opera. Al

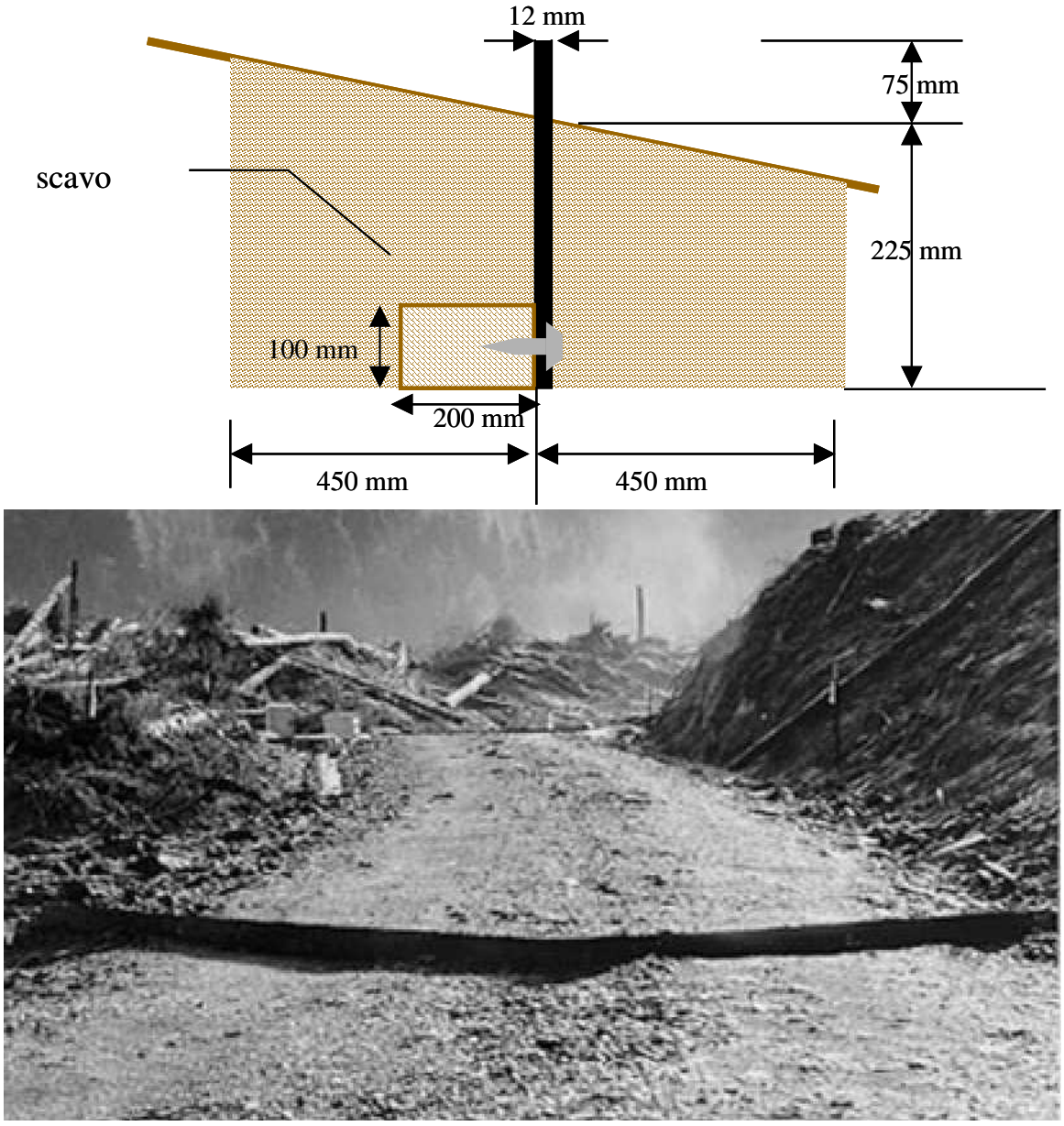


Figura 45: deflettori in gomma (da Gonzales, 1998)

contrario, su strade a bassa intensità di transito, su piste di esbosco temporanee è consigliabile orientarsi sui manufatti più leggeri;

- *Robustezza dei materiali* - possono condizionare la scelta della tipologia in relazione al tipo di utilizzo o alle caratteristiche climatiche (gelo) e di produzione solida (colate detritiche);
- *Caratteristiche geometriche dei manufatti* - condizionano sia la transitabilità, sia la facilità di manutenzione

7.4 Opere di drenaggio in pietrame

Per fornire una base al prisma stradale nelle zone di captazione del deflusso sottosuperficiale e per la dispersione del deflusso concentrato è possibile realizzare opere che abbinano i principi del cuneo drenante, tipico delle sistemazioni di versanti umidi, con quello del muro a secco. Ne risulta un tratto di strada costituito da pietrame ad elevata permeabilità, che permette di evitare ristagni pericolosi per la circolazione e per la stabilità della strada.

In tali opere è bene che la parte più superficiale, che costituisce la sede stradale sia costituta da pietre grandi e piatte, separate dagli strati sottostanti per mezzo di uno livello di geosintetico.

Figura 46: tratto di strada in zona di affioramento di deflusso sottosuperficiale realizzato in pietrame a secco (da Moll, 1999)

8 MANUFATTI PER L'ATTRAVERSAMENTO DI CORSI D'ACQUA E IMPLUVI

8.1 Introduzione

L'attraversamento dei corsi d'acqua minori e degli impluvi è uno degli aspetti più critici della presenza della viabilità agro-silvo-pastorale su di un versante ed in generale nei bacini montani e pedemontani. L'inefficienza o l'insufficienza delle opere realizzate per il loro attraversamento, infatti, può causare la diversione del deflusso inalveato verso la sede stradale e poi sul versante, innescando i fenomeni già illustrati nel § 4.1. Chiaramente gli effetti dell'eventuale diversione dipendono da numerosi fattori legati al livello d'insufficienza manifestato dall'opera, dall'entità della diversione e soprattutto dalle caratteristiche del versante in termini di substrato, pendenza e copertura vegetale.

Diversi studi (Hagans and Weaver 1987; Best et al., 1995; Weaver et al., 1995; Park et al. 1998; Furniss et al., 1998; Copstead et al., 1998) hanno ampiamente dimostrato che i fenomeni di diversione sono spesso la causa principale di dissesto in bacini attraversati da strade forestali e agro-silvo-pastorali arrivando a costituire la causa di oltre il 95% dei dissesti legati alle strade. Nella maggior parte dei casi, però, l'inefficienza delle opere d'attraversamento non è dovuta ad un errato dimensionamento idraulico, bensì al loro intasamento con detriti e/o materiale legnoso (Furniss et al., 1998), che nell'ambiente montano e pedemontano sono trasportati in abbondanza dai piccoli corsi d'acqua e dagli impluvi. I metodi di dimensionamento degli attraversamenti delle strade agro-silvo-pastorali, di conseguenza, dovrebbero tenere conto della dinamica del trasporto solido e del materiale flottante, anche se purtroppo, considerata la complessità dei processi e la scarsità di dati che caratterizza i piccoli bacini montani, allo stato attuale non si dispone di adeguati schemi di calcolo utilizzabili in ambito progettuale. Il progettista, di conseguenza, dovrebbe supportare le consuete metodologie di calcolo idraulico con un'attenta valutazione delle caratteristiche specifiche del punto sede del potenziale attraversamento.

In generale, date le incertezze e le difficoltà insite nella valutazione delle portate liquide e solide e di conseguenza delle sezioni da assegnare, è buona norma definire il tracciato in maniera tale da ridurre il numero degli attraversamenti e soprattutto definire e realizzare uno schema di gestione dell'acqua in cui si realizzino manufatti con un *potenziale di diversione* limitato (cfr. § 4.2). Tale obiettivo può essere raggiunto combinando i manufatti d'attraversamento con opportune opere complementari ed una sagomatura della sede stradale con pendenza verso valle

in maniera tale che anche nel caso in cui il deflusso arrivi al piano stradale, esso sia forzato a rientrare in alveo immediatamente a valle (cfr. Figura 11).

Al fine di valutare il rischio derivante da diversioni, infine, sarebbe opportuno disporre, come è stato fatto in altri paesi, di un catasto dei punti d'attraversamento da monitorare periodicamente in cui siano riportati la possibilità di diversione, l'elemento in cui si riversa il deflusso (cunetta o strada), la lunghezza potenziale della diversione, l'elemento su cui si riversa il deflusso deviato (versante di valle, ulteriori tratti di strada, canalette, ecc.).

8.2 Dimensionamento degli attraversamenti

8.2.1 Normativa

La Regione Lombardia ha recentemente emanato una D.G.R. inerente la "*Determinazione del reticolo idrografico principale e trasferimento delle funzioni di polizia idraulica del reticolo minore*" (n. 7/7868 del 25 gennaio 2002 e successiva modifica D.g.R. 7/13950 del 1 agosto 2003) che definisce il reticolo idrografico principale di competenza regionale, lasciando ai Comuni (con l'ausilio delle Comunità Montane) il compito di definire e regolamentare il reticolo minore e quindi anche quello di definire i criteri tecnico-progettuali di riferimento per i relativi attraversamenti.

Per quanto riguarda le indicazioni relative alle opere di attraversamento, la D.G.R. n. 7/7868 contiene solamente indicazioni piuttosto generali ed un riferimento alla Direttiva dell'Autorità di Bacino del fiume Po "*criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno di fasce A e B*" paragrafi 3 e 4 (delibera A.d.B. n.2/99). Sebbene questi ultimi siano stati redatti per manufatti d'attraversamento con luci superiori a 6 m e raramente gli attraversamenti della viabilità agro-silvo-pastorale raggiungano tali dimensioni, i Comuni possono chiedere d'attenervisi anche nel caso di opere minori. In ogni caso, sempre secondo la D.G.R. n. 7/7868, il progetto degli interventi dovrà essere accompagnato da una relazione idrologico-idraulica con il calcolo della portata con un Tempo di Ritorno di 100 anni e un franco di 1 metro; solo in casi eccezionali di piccoli corsi d'acqua, manufatti modesti e con motivazioni tecniche adeguate potranno essere assunti un Tempo di Ritorno e un franco minori.

Per la redazione della relazione idrologica e idraulica, i criteri indicati dalla sopra accennata direttiva dell'A.d.B. del f. Po risultano spesso decisamente onerosi rispetto alla semplicità delle opere d'attraversamento della viabilità agro-silvo-pastorale, e sarebbe auspicabile che gli organismi regionali ne tenessero conto. In particolare, dopo aver definito il limite tra

attraversamenti che possono avvalersi di una progettazione semplificata e quelli che devono invece sottostare ad una progettazione più complessa (basandosi ad esempio sulle dimensioni della sezione o del bacino contribuente), occorrerebbe definire criteri di dimensionamento adatti alla realtà dei piccoli corsi d'acqua e degli impluvi in ambito agro-silvo-pastorale, utilizzabili ed affidabili anche in assenza delle informazioni richieste dai metodi di calcolo indicati dall'A.d.B (formula razionale e metodo CN; si veda l'Appendice 1).

8.2.2 Calcolo della portata

Gli unici strumenti attualmente a disposizione per il calcolo della portata liquida nel caso degli attraversamenti di piccoli corsi d'acqua ed impluvi, sono i metodi comunemente utilizzati per i piccoli bacini; tali metodi sono riassunti in Appendice 1. Si ritiene tuttavia opportuno sottolineare che tali metodi sono stati sviluppati per bacini con superficie compresa tra alcuni km^2 e alcune decine di km^2, mentre gli attraversamenti delle strade agro-silvo-pastorali frequentemente sottendono bacini con superficie inferiore, e che, a parte i metodi più semplici basati sull'area contribuente, normalmente le informazioni di base per la loro corretta applicazione mancano quasi completamente.

Una possibile alternativa è costituita da alcuni metodi basati sulle evidenze geomorfologiche di eventi di piena verificatisi nel punto di attraversamento o in impluvi limitrofi con caratteristiche simili (cfr. appendice pag. 78). Tali metodi, che sono già utilizzati da diversi anni in alcune Nazioni, possono costituire un interessante riferimento anche nella realtà italiana nonostante non siano ancora stati recepiti dalla normativa.

8.3 Opere

8.3.1 Ponti

Figura 47: campata di un ponticello su strada agro-silvo-pastorale intasato da materiale legnoso

Pur non volendo entrare nel merito della progettazione e della costruzione dei ponti, per le quali si rimanda ai testi di costruzioni forestali, si ritiene utile ribadire che a dispetto della loro semplicità, queste opere devono essere accuratamente dimensionate, soprattutto per tenere conto del trasporto di materiale solido e legnoso. In generale, per questo tipo di opere sarebbe meglio optare per

soluzioni ad una sola campata, meno facilmente ostruibile dal trasporto di materiale solido e legnoso.

8.3.2 Tombotti

I tombotti sono comunemente utilizzati per attraversare piccoli corsi d'acqua ed impluvi per i quali la realizzazione di un ponte sarebbe eccessivamente onerosa e la realizzazione di un guado in grado di smaltire la portata di piena sarebbe di ostacolo per il transito. La facilità con cui questo tipo di opere possono intasarsi a causa del deposito di detrito e materiale legnoso e divenire inefficienti, tuttavia, richiede grande cautela nel loro dimensionamento e nella successiva manutenzione; inoltre, è opportuno che i tombotti siano realizzati di concerto con una adeguata sagomatura del piano stradale per evitare che possano innescarsi diversioni (cfr. § 4.1).
Il segmento stradale che ospita il tombotto è bene che sia realizzato con due accorgimenti: in corrispondenza dell'attraversamento vi sia un avvallamento sul piano stradale (realizzato con una sorta di cordolo in terra perpendicolare alla linea stradale) e che questi sia inclinato verso valle; in questo modo anche in caso di intasamento o di insufficienza idraulica, il deflusso in eccesso si reimmette in alveo a valle della strada senza divergere (Figura 48).

8.3.2.1 Dimensionamento

Le dimensioni dei tombotti, come già accennato, devono essere adeguate sia alla portata liquida, che a quella solida. Nei bacini montani e pedemontani quest'ultima è particolarmente rilevante durante gli eventi intensi ed è bene utilizzare manufatti con diametro non inferiore ad 1 metro, sia per ridurre il rischio d'intasamento, sia per consentire l'ingresso ad una persona per le ispezioni e la manutenzione. A tale

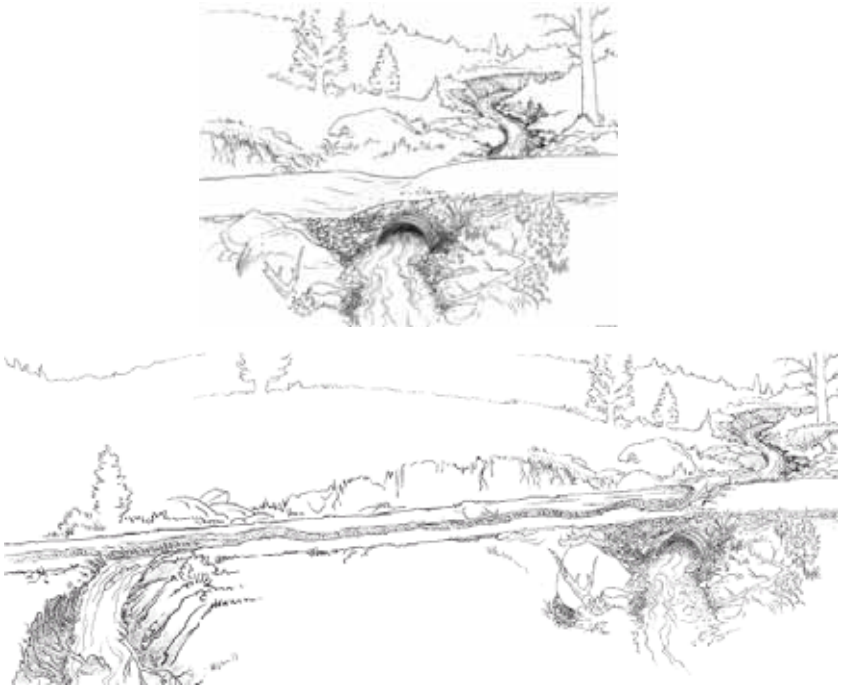


Figura 48: la sagomatura del piano stradale in corrispondenza di un tombotto consente di evitare diversioni (da Furniss et al.,1997)

riguardo un'indagine nel distretto di Detroit negli USA, ha messo in luce che i tombotti con diametro inferiore a 0.6 m erano intasati nell'81% dei casi (Copsteat et al., 1998).

L'intasamento dei tombotti è favorito da un rallentamento del deflusso che provoca la sedimentazione del materiale solido trasportato e da una installazione non corretta. Il livello idrico nell'alveo a monte dell'ingresso del tombotto (H_w) non deve superare il bordo superiore del tombotto stesso (Figura 49a) ed alcuni tecnici utilizzano, in via cautelativa, diametri di 1.5÷2 volte tale valore. È bene evitare che all'ingresso del tombotto si possano formare rallentamenti del deflusso e ristagni che causano la deposizione di materiale e quindi ne riducono l'efficienza fino ad intasarlo. Questi possono essere ridotti evitando allargamenti dell'alveo in prossimità dell'imboccatura (Figura 49b), riduzioni della pendenza nel tombotto (Figura 49c) e raccordi alveo-tombotto con angoli eccessivi (Figura 49d).

Talvolta può essere utile proteggere dall'erosione ai lati dell'imboccatura, collocando del pietrame.

In relazione al materiale con cui è costruito, occorre ricoprire i tombotti con uno strato di materiale di spessore adeguato al fine di evitare deformazioni e rotture che ne possono compromettere l'efficienza.

8.3.3 Guadi

Si tratta di opere adeguate all'attraversamento di corsi d'acqua caratterizzati da profondità modeste (inferiore a 1 m), fondo stabile (in roccia o ciottoli di grandi dimensioni) e portata limitata o saltuaria; la profondità del guado, infatti, deve essere modesta per non ostacolare eccessivamente il transito. Questa soluzione può comunque essere idonea per l'attraversamento di impluvi con un elevato potenziale di trasporto solido. I guadi devono essere costruiti con materiale resistente all'abrasione esercitata dall'acqua e dal materiale trasportato per cui sono generalmente costruiti in pietrame e malta o calcestruzzo (Figura 50). Per agevolare il transito occorre creare rampe di raccordo e per garantirne la stabilità è bene che siano dotati di opere di protezione a valle e a monte costituite da briglie e soglie.

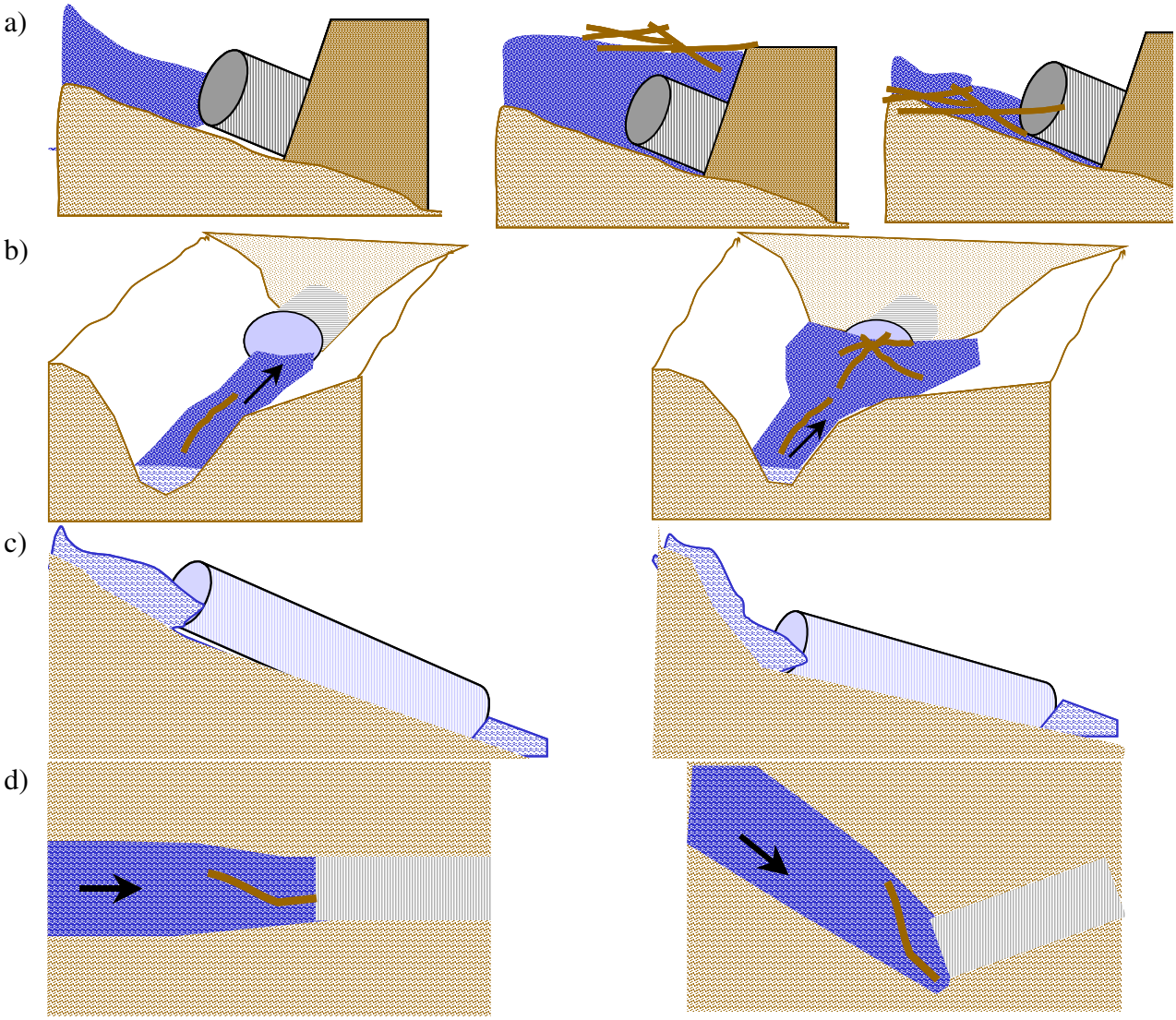


Figura 49: metodi per ridurre il rischio d'intasamento dei tombotti (da Furniss et al., 1998)

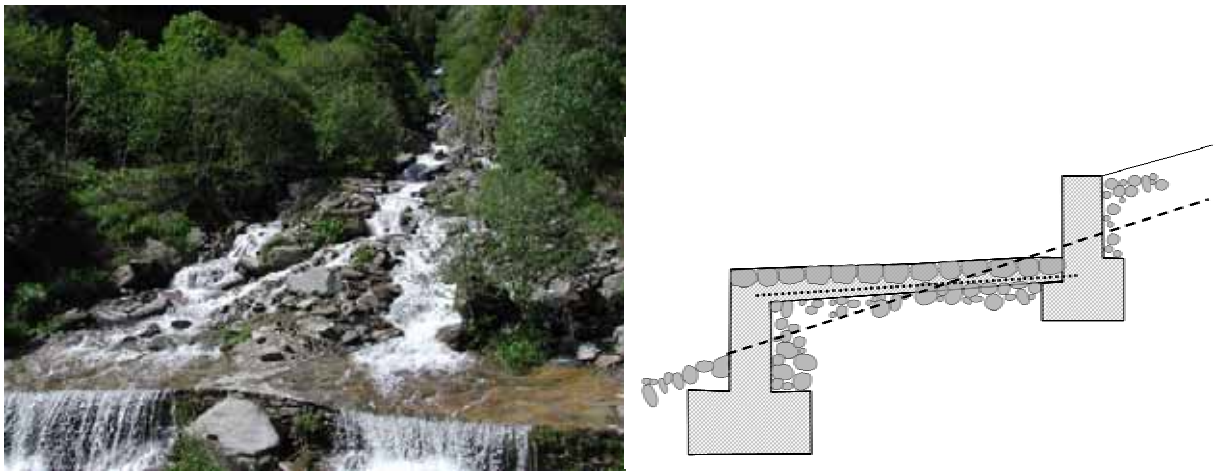


Figura 50: guado in pietrame e malta e pietrame con platea e muri in calcestruzzo

9 PENDENZA DELLE SCARPATE E OPERE DI STABILIZZAZIONE[5]

9.1 Introduzione

Per scarpata s'intende la superficie di raccordo tra il solido stradale e il terreno naturale; in generale, le scarpate hanno pendenza unica che dipende da molteplici fattori quali le caratteristiche del terreno, la stabilità geotecnica, la possibilità di erosione e problemi d'impatto ambientale.

La normativa nazionale per le strade "civili" (C.N.R., 1980) e per scarpate d'altezza non elevate (intorno ai 3 metri) dà alcune indicazioni di massima, consigliando pendenze non superiori ad 1/5; quando per motivi pratici tale pendenza non risulti adottabile (e comunque per altezze maggiori di 3 metri) diventa più conveniente arrivare gradatamente a pendenze di 2/3, realizzando contemporaneamente opere di contenimento del terreno e di drenaggio e raccolta delle acque di deflusso. Volendo affrontare l'argomento con un maggior dettaglio, occorre innanzitutto differenziare la pendenza da assegnare alle scarpate in funzione del tipo di "substrato" in cui si realizza lo scavo distinguendo tra scarpate in roccia e scarpate in terreni.

9.2 Scarpate in roccia

Nelle situazioni di scavo in rocce compatte, non alterate, con modesta anisotropia meccanica, in genere non si manifestano grossi problemi di stabilità per cui, in linea di principio, sarebbe possibile adottare pendenze elevate, pressoché verticali. Tale soluzione, sebbene minimizzi lo scavo, è sconsigliabile in termini di sicurezza del transito e di costi di manutenzione; essa, infatti, può portare ad un degrado della scarpata più o meno rapido in funzione del tipo di roccia e dell'intensità dei fenomeni atmosferici, con conseguente caduta di elementi di varia grandezza sulla sede stradale. Per ovviare a tali inconvenienti è buona norma assegnare alle scarpate pendenze minori di quelle strettamente richieste in termini di stabilità; in generale, per altezze inferiori a 8-10 metri si può far riferimento ai valori di massima riportati nella Tabella VIII. La letteratura, in ogni caso, riporta valori della pendenza delle scarpate di scavo in roccia mai superiori ad un rapporto di 4/1; in genere, inoltre, le scarpate di riporto si realizzeranno secondo un'inclinazione inferiore rispetto a quelle di scavo.

[5] Il capitolo è stato redatto con il contribuito del Dr. Geol. Tommaso Simonato

Tabella VIII: Valori medi delle pendenze di scarpate in roccia.

Tipo di roccia	Legenda Carta Litologica Cartografia Geoambientale Regione Lombardia[6]	Pendenza scarpata (vert/orizz)
Rocce ignee	IA, IB, EA, EB, FL	4/1 – 2/1
Rocce sedimentarie		
arenarie e calcari massicci	Ac, As, Cm, Cn, Dm	4/1 – 2/1
rocce stratificate (orizzontali o a reggipoggio)	Cs, Dm (se stratificata)	2/1 – 1.33/1
marne e argilliti	Al, Fl, Am, Mc, Ss	1.33/1 – 1/1
Rocce metamorfiche		
gneiss, scisti, serpentiniti, marmi	GN, MQ, MC	4/1 – 2/1
ardesie, filladi	FD	2/1 – 1.33/1

Se lo scavo viene realizzato in rocce stratificate e fratturate (caso piuttosto frequente nella pratica), possono verificarsi problemi di stabilità, anche molto complessi, in funzione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso e delle caratteristiche delle discontinuità presenti. Lo studio della stabilità in questi casi può diventare complesso, sia per la quantità di informazioni geologiche necessarie, sia perché molto spesso la superficie di distacco non può essere considerata piana. Per situazioni di questo tipo si raccomanda di ricorrere a tecnici specializzati in grado di utilizzare una schematizzazione adeguata dei problemi di stabilità dei pendii in roccia.

9.3 Scarpate in terreni

Quando lo scavo interessa i terreni sciolti la pendenza della scarpata deve essere assegnata in modo tale da garantire la stabilità del pendio con un opportuno coefficiente di sicurezza (si ricorda che la normativa geotecnica in materia di pendii fissa il Fattore di Sicurezza minimo nel valore di 1.3). Tralasciando qui ogni dettaglio circa i diversi metodi d'analisi di stabilità dei pendii, vengono di seguito proposte alcune indicazioni di massima circa l'inclinazione delle scarpate.

Nel caso in cui non siano disponibili studi specifici (relazioni geotecniche) riguardanti la tipologia del terreno interessato dalle operazioni di scavo, di norma in Italia la scarpata di monte si realizza con una pendenza di 1/1, anche se sono tuttavia possibili inclinazioni maggiori sino a 3/2 sui terreni più stabili (di natura grossolana), mentre dovranno essere ridotte a 2/3 per terreni fini coesivi, soprattutto in presenza di acque sottosuperficiali. Nelle scarpate di riporto, il materiale può essere disposto secondo l'angolo naturale di attrito interno (Bortoli, 1982).

[6] Per una definizione particolareggiata delle litologie si rimanda all'Appendice 3

Anche nella letteratura straniera i riferimenti relativi all'inclinazione delle scarpate sono scarsi, soprattutto in relazione alla classificazione granulometrica del terreno interessato dallo scavo. In Tabella IX si riportano i valori utilizzati in Canada e negli Stati Uniti d'America, in funzione della granulometrica del materiale.

Tabella IX: Linee guida per la pendenza delle scarpate di scavo e di riporto (modificato da British Columbia Forest Code, 1995)

Scarpate di scavo		**Scarpate di riporto**	
materiale[7]	***pendenza***	***materiale***	***pendenza***
miscele di sabbia e ghiaia (GP) sabbie da sciolte ad addensate (SW, SP)	1/1.5	miscele di sabbia e ghiaia (GP) sabbie (SW, SP) miscele di ghiaia, sabbia, limo e argilla (GM, GC)	1/1.5
sabbie limose (SM)	1/1		
limi da addensati a molto addensati sino a cementati (ML)	1/0.75	limi (ML, MH) argille (CL, CH)	1/2.5
limi soffici, limi argillosi (MH)	1/1.5		
argille limose (CL) argille inorganiche (CH)	1/1		

Si noti che tali valori nell'ambiente italiano devono essere intesi come indicativi e soprattutto, essi valgono per scarpate d'altezza inferiore a 5 metri. La fonte stessa della tabella, inoltre, consiglia di ridurre le pendenze in corso d'opera nel caso vi sia la presenza di fratture di trazione di neoformazione (o a monte della scarpata o sulla superficie stradale) o nel caso in cui insorgano fenomeni di instabilità lungo il pendio interessato dall'opera.

Altri valori che oltre alla classificazione granulometrica del terreno fanno riferimento anche alla sua origine sono riportati in Tabella X, che fornisce anche l'indicazione di alcuni parametri geotecnici utili per i principali impieghi dei materiali in ambito ingegneristico.

9.4 Opere di stabilizzazione

A volte la pendenza da conferire alle scarpate per garantirne la stabilità può essere molto piccola a causa delle caratteristiche meccaniche del substrato, delle condizioni di saturazione e, nel caso delle scarpate di valle, dei carichi che transitano sulla strada. In tali casi la parte di versante interessata dalle operazioni di movimento terra diviene rilevante ed è opportuno, sia per gli aspetti generali d'impatto sull'ambiente, sia per motivi di convenienza economica, ricorrere alla

[7] classificazione USCS (Unified Soil Classification System) riportata nell'appendice 2

Tabella X: Proprietà fisico-meccaniche e indicazioni a scopo ingegneristico dei terreni (da: Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78-1989*, modificato)*

classificazione		**Peso di volume secco**	**angolo di resistenza al taglio**	**coesione**	**erodibilità relativa**	**capacità portante**	**difficoltà di scavo**	**inclinazione scarpata**
origine	**USCS**							
		g/cm³	°	***kg/cm²***		***kg/ cm²***		***%***
alluvionali								
alta energia	GW, GP, GM	1.85 – 2.10	30 - 35	0	bassa	0.,75 – 1.,00	bassa	50÷65
bassa energia	ML, SM, SP, SW	1.45 – 1.85	15 - 30	0 – 0.25	medio-alta	0.25 – 0,75	bassa	25÷50
glaciali								
till	SM, ML	1.90 – 2.25	35 - 45	0.50 – 2.00	medio-bassa	0.75 – 2.50	medio-alta	50÷100
fluvioglaciali	GW, GP SW,SP,SM	1.85 – 2.10	30 - 40	0 – 0,50	medio-bassa	0.75 – 1.50	medio-bassa	50÷70
glaciolacustri	ML, SP,SM	1.60 – 1.90	30 - 40	0 – 1.50	medio-alta	0.50 – 1.00	media	25÷50
lacustri								
inorganici	ML, SM, MH	1.10 – 1.60	5.0 - 20	0 – 0.10	alta	0 – 0.25	bassa	0÷25
organici	OL, PT	0.5 – 1.10	0 - 10	0 – 0.10	alta	0 – 0.25	bassa	0÷25
eolici								
loess	ML, SM	1.25 – 1.60	20 - 30	0.25 – 0.50	molto alta	0.25 – 0.50	bassa	25÷50

stabilizzazione delle scarpate con opere di sostegno o di rinforzo per poterne aumentare la pendenza.

Le scarpate in terra, inoltre, devono essere opportunamente protette dall'erosione superficiale immediatamente dopo la loro realizzazione, con adeguate opere di copertura.

Nel caso della viabilità agro-silvo-pastorale, date le caratteristiche dell'ambiente circostante, risultano particolarmente idonee tutte le opere realizzate con tecniche di ingegneria naturalistica per le quali si rimanda al *quaderno delle opere tipo di ingegneria naturalistica* della Regione Lombardia (D.G.R. 29 febbraio 2000 – n. 6/48740 1° suppl. str. B.U.R.L. 19 – 9 maggio 2000).

In particolare, nel caso delle opere legate alla viabilità agro-silvo-pastorale risultano particolarmente indicate le palificate, le grate vive, i muri a secco e le scogliere per quanto riguarda le opere di stabilizzazione, le gradonate per quanto riguarda le opere di rinforzo, l'inerbimento (semplice o con idrosemina), la copertura diffusa con astoni e le biostuoie e geostuoie, per quanto riguarda gli interventi di copertura.

10 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

A.d.B. del fiume Po (1999) criteri per la valutazione della compatibilità idraulica delle infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico all'interno di fasce A e B, delibera A.d.B. n.2/99

A.d.B. del fiume Po (2001) sulla piena di progetto da assumere per le progettazioni e le verifiche di compatibilità idraulica, Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI) – interventi sulla rete idrografica e sui versanti - norme d'attuazione, Delibera del Comitato Istituzionale n. 18/2001.

Amaranthus, M.P., Rice, R.M., Barr, N.R., Ziemer, R.R. (1985) Logging forest roads related to increased debris slides in southwestern Oregon, *Journal of forestry*, 83(4), 229-233.

Benini, G. (1990) Sistemazioni idraulico forestali, UTET, Torino

Best, D. W., Kelsey, H. M., Hagans, D.K., Alpert, M. (1995) Role of Fluvial Hillslope Erosion and Road Construction in the Sediment Budget of Garret Creek, Humboldt County, California, In: Nolan, K. M., Kelsey, H. M., Marron, D.C. (a cura di) *Geomorphic Processes and Aquatic Habitat in the Redwood Creek Basin, Northwestern California*, M1-M9 U.S. Geological Survey Professional Paper.

Betson, R.P., Marius, J.B., Joyce, R.T. (1968) Detection of saturated interflow in soil with piezometers, *Proc. Soil Science Society of America*, 32, 602.

Bortoli, P.L. (1982) *Criteri tecnici generali per la programmazione, progettazione ed esecuzione della viabilità forestale*, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia, direzione Regionale delle Foreste, Tolmezzo (UD), Italia, 66 pp.

Bortoli, P.L. (2001) *Viabilità forestale regionale*, intervento al Seminario *Viabilità forestale e agro-silvo-pastorale*, 10 ottobre 2001, Barzio, Italia.

Bowling, L.C., Lettenmeier, D.P., (1997) Evaluation of the effects of forest roads on streamflow in Hard and Ware Creeks, Washington, *Water Resources Series Tech. Rep. 155*, University of Washington, Department of Civil Engineering, Seattle, USA, 189 p.

Burroughs E. e King J.G (1989) Reduction of soil erosion on forest roads, USDA For. Ser. Intermountain Res. Stn. Gen. Tech. Rep. INT-264. 24p.

Burroughs E.; Watts F. J.; Haber D.F. (1984) Surfacing to reducing erosion of forest roads built in granitic soils. in 'Symposium of effects of forest land use on erosion and slope stability.', (O'loughlin C. L.; Pearce A. J., editors). Univ. of Hawaii, 1984, pp. 255-264.

Brinker, R.W., Tufts, R.A. (1995) Forest roads and construction of associated water diversion devices, *Alabama Cooperative Extension System ANR-916*.

Britsh Columbia Forest Code (1995) *Forest Road Engineering Guidebook*, Britsh Columbia Forest Service

C.N.R. (1980) *Caratteristiche geometriche delle Strade extraurbane*, Roma.

C.N.R. (1982) *Valutazione delle piene*, P.F. Conservazione del Suolo – Dinamica fluviale, Pubblicazione n. 165.

Cook, W.L., Jr. e Hewlett, J.D. (1979) The Broad-Based Dip on Piedmont Woods Roads, *Southern Journal of Applied Forestry,* 3, 77-81.

Copstead, R., Johansen, D.K. (1998) Water/road interaction: examples from three flood assesment sites in western Oregon, *Water/road interaction series Report 9877 1805 – STDC*, San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 15 pp.

Copstead, R.., Johansen, D.K., Moll, J. (1998) Water/road interaction: introduction to surface cross drains, *Water/road interaction series Report 9877 1806 – STDC*, San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 16 pp.

Croke, J., Hairsine, P., Fogarty, P. (1999) Runoff generation and re-distribution in logged eucalyptus forests, south-eastern Australia, *Journal of Hydrology*, 216, 56–77.

Darrach, A.G., Sauerwein, W.J., Hally, C.E. (1981) Building water pollution control into small private forest and ranch land roads, *R6-S&PF-006-1980*, Portland, USA, USDA Forest Service e Soil Conservation Service.

Donald, J.A., Wemple, B.C., Grant, G.E., Swanson, F.J. (1996) Interaction of logging roads with hillslope and channel processes during the February 1996 flood in western Oregon. [Abstract], *EOS Transactions, American Geophysical Union*, AGU Fall Meeting, 15-19 dicembre 1996, San Francisco, USA, 77(46), F273.

Dunne, T. (1969) *Runoff production in a humid area*, Ph.D. Dissertation, Department of Geography, John Hopkins University, Baltimora, Maryland, USA.

Dunne, T. (1978) Field studies of hillslope flow processes, in Kirkby, M.J. (1978) *Hillslope hydrology*, J. Wiley, Chichester, G.B., 227-293.

Dunne, T., Black, R.D. (1970) Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed, *Water Resources Research*, 6, 1296-1311.

Eck, R.W., Morgan, P.J. (1987) Culverts versus dips in the Appalachian Region: a performance-based decision making guide, *Transportation Research Record 1106*, USA.

Elliot, W.J, Graves, S.M., Hall, D.E., Moll, J.E. (1998) The X-DRAIN Cross Drain Spacing and Sediment Yield Model, *Water/Road Interaction Technology Series, 9877-1801-SDTDC*, San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 23 pp.

Elgmork, K. (1978) Human impact on a brown bea population (*Ursus artcos* L.), *Biological conservation*, 13, 81-103.

FAO (1998) *Proceedings of the seminar on environmentally sound forest roads and wood transportation*, Sinaia, Romania, 17-22 giugno 1996, FAO, Roma, Italia.

Furniss, M.J., Love, M.A., Flanagan, S.A. (1997) Diversion potential at road-stream crossings. *Water/Road Interaction Technology Series, 9777-1814-SDTDC*, San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 12 p.

Furniss, M.J., Ledwith, T.S, Love, M.A., McFadin, B.C., Flanagan, S.A. (1998) Response of road–stream crossing to large flood events in Washington, Oregon and Northern California, *Water/road interaction series Report 9877 1806 – STDC,* San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 14 pp.

Gardner, R.B. (1979) Some environmental and economic effects of alternative forest road design, *Transaction of the ASAE*, 22, 63-68.

Gonzales, R. (1998) Cross drain update, *Water/road interaction series Report 9877 1804 – STDC,* San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 14 pp.

Gucinski, H., Furniss, M.J., Ziemer, R.R., Brookes, M.H. (2000) *Forest roads: a synthesis of scientific information*, USDA Forest Service, giugno 2000.

Hafner, F. (1971) *Forstlicher Strassen und wegebau*, Osterrreichischer, Agrarverlag, Vienna.

Hafterson, H.D. (1973) Dip design, *Field notes*, USDA Forest Service Engineering Technical Information System, 5, 1-18.

Hagans, D.K., Weaver, W.E. (1987) Magnitude, Cause and Basin Response to Fluvial Erosion, Redwood Creek Basin, Northern California, In: Beschta, R.L., Blinn, T., Grant, G. E., Swanson, F. J., Ice, G.G. (a cura di) *Erosion and Sedimentation in the Pacific Rim,* International Association of Hydrologic Sciences, Publication 165, 419-428.

Harr, R.D., Harper, W.C., Krygier, J.T., Hsieh, F.S. (1975) Changes in storm hydrographs after road buildingand clear-cutting in the Oregon Coast Range, *Water Resources Research*, 11, 436-444.

Haupt, H.F. (1959) *A Method for Controlling Sediment from Logging Roads*, Misc. Pub. No. 22. Ogden, Utah, U.S. Department of Agriculture, 22 pp.

Haussman, R.F, Pruett, E.W. (1973) Permanent logging roads for better woodlot management, *USDA Forest Service State and Private Forestry Northeastern Area*, USA.

Hewlett, J.D., Hibbert, A.R. (1963) Moisture and energy conditions within a sloping soil mass during drainage, *J. Geophys. Res.*, 68, 1081-1087.

Hewlett, J.D., Hibbert, A.R. (1967) Factors affecting the response of small watersheds to precipitation un humid areas, in: Sopper, W.E., Lull, W.H. (a cura di) *International Symposium on forest hydrology*, Pergamon, Tarrytown, New York, USA, 275-290.

Hinterstoisser, H. (1990a) Mehr Umwelterziehung – Ökologische Mindeststandards – Stufenplan für Walderschließung, *Österreichische Forstzeitung*, 1, 21.

Hinterstoisser, H. (1990b) Fortwege: Irrwege- Auswege, *Österreichische Forstzeitung*, 1, 19-20.

Horton, R.E. (1933) The role of infiltration in the hydrologic cycle, *EOS Trans. Of AGU*, 14, 446-460.

Hursh, C.R. (1936) Storm-water and adsorption, *EOS Trans. AGU*, 17, 301-302.

Jakob, M. (2000) The impacts of logging on landslide activity at Clayoquot Sound, British Columbia, *Catena*, 38, 279–300.

Johansen, D.K., Copstead, R., Moll, J. (1997), Relief culverts, *Water/road interaction series Report 9877 1804 – STDC,* San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 7 pp.

Jones, J.A., Grant, G.E. (1996) Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon, *Water Resources Research*, 32(4), 959-974.

Kincaid, D.R., Osborn, H.B., Gardner, J.H. (1966) Use of unit-source watersheds for hydrologic investigations in semi-arid southwest, *Water Resources Research*, 2, 381-392.

King, J.G., Tennyson, L.C. (1984) Alteration of streamflow characteristics following road construction in north central Idaho, *Water Resources Research*, 20, 1159-1163.

Kirkby, M.J. (1978) *Hillslope hydrology*, J. Wiley, Chichester, G.B., 389 pp.

Kochenderfer, J.N., Helvey, J.D. (1987) Using gravel to reduce soil losses from minimum-standard forest roads, Journal of Soil and Water Conservation, 1987, 42(1), pp. 46-50

Lusby, G.C., Turner, G.F., Thompson, J.R., Reid, V.H. (1963) Hydrologic and biotic characteristics of grazed and ungrazed watershed of the Badger Wash Basin in western Colorado, 1953-58, *Water-supply Paper* 1533-B, U.S.Geological Survey.

Loudermilk, W.C. (1934) The role of vegetation in erosion control and water conservation, *Journal of Forestry*, 32, 529-536.

Marchi, E., Spinelli, R. (1997) L'impatto ambientale delle strade forestali, *L'Italia forestale e montana*, 4, 222-239.

Mazzalai, P. (1987) *Appunti di costruzioni forestali*, CUSL, Padova.

McCashion, J.D., Rice, R.M. (1983) Erosion on logging roads in northwestern California: how much is avoidable?, *Journal of Forestry*, 81, 23-26.

McClelland, D.E., Folz, R.B., Falter, C.M., Wilson, W.D., Cundy, T., Schuster, R.L., Saurbier, J., Rabe, C., Heineman, R. (1999) Relative effects on a low volume road system of landslides resulting from episodic storms in Northern Idaho, *Transportation Research Record*, n. 1652, vol.2, 235-243.

Megahan, W.F. (1984) Tagli di bosco e strade: impatto ecologico e danno economico, *Economia Montana*, 3, 3-6.

Megahan, W.F., Kidd, W.J. (1972) Effect of logging roads on sediment production rates in the Idaho batholith, *Research Paper INT-123*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 14 p.

Moll, J. (1999) Minimizing low volume road water displacement*, Water/road interaction series Report 9777 1804 – STDC*, San Dimas Technology and Development Center, San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 18 pp.

Moll, J., Copstead, R, Johansen, D.K. (1997) Travelled way surface shape*, Water/road interaction series Report 9777 1808 – STDC*, San Dimas Technology and Development Center, San Dimas, California, U.S.A., U.S.D.A., Forest Service, Technology and Development Program, 10 pp.

Montgomery, D.R., Dietrich, W.D., Torres, R., Prestrud Anderson, S., Heffner, J.T., Loague, K. (1997) Hydrologic response of a steep, unchanneled valley to natural and applied rainfall, *Water Resources Research*, 33, 91-109.

Packer, P.E. (1967) Criteria for designing and locating logging roads to control sediment, *Forest Science*, 13, 1-18.

Packer, P.E., Christiansen, G.F. (1964) Guides for controlling sediment from secondary logging roads, *USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experimentation Station and Northern Region*.

Park, C., Ricks, C., Risley, C., Weinhold, M., McHugh, J., Gross, E., Wiedenbeck, R., Frick, R. (1998) *Storms of November and December 1996, Siskiyou National Forest, Grants Pass, OR.*

Preliminary Assessment Report.

Pearce, A.J. (1973) *Mass and energy flux in physical denudation, defoliated areas, Sudbury*, Ph.D. Dissertation, Department of Geological Sciences, McGill University, Montreal, Canada.

Pozzatti, A., Cerato, M. (1984) Note pratiche sulla progettazione delle strade forestali, *L'Italia forestale e montana*, 5, 263-274.

Querini, R. (1989) L'idrologia delle strade forestali, *Dendronatura*, 2, 18-29.

Rawitz, E., engman, E.T., Cline, G.D. (1970) Use of the mass balance method for examining the role of soils in controlling watershed performance, *Water Resources Research*, 6, 115-123.

Regione Lombardia (2000) *Quaderno delle opere tipo di ingegneria naturalistica* della Regione Lombardia, D.G.R. 29 febbraio 2000 – n. 6/48740 1° suppl. str. B.U.R.L. 19 – 9 maggio 2000

Reid, L.M., Dunne, T. (1984) Sediment production from road surfaces, *Water Resources Research*, 20(11), 1753-1761.

Rood, K.M. (1984) An aerial photograph inventory of hte frequency and yield mass wasting of the Queen Charlotte Islands, *Land Management Report n. 34*, Ministry of Forests, British Columbia, Canada.

Rothacher, J. (1965) Streamflow from small watersheds on the western slope of the Cascade Range of Oregon, *Water Resources Research*, 1, 125-134.

Rothwell, R.L. (1978) Watershed management guidelines for logging and road construction in Alberta, *Inf. Rep. NOR-X-208*, Canadian Forestry Service, Northern Forest Research Centre, Edmonton, Alberta, 43 pp.

Sidle, R.C. (1985) Factors influencing the stability of slopes, *Proceedings of a workshop on slope stability: problems and solution in forest managment*, Seattle, U.S.A., USDA General Technical Report PNW-180.

Sullivan, K.O., Duncan, S.H., (1981) Sediment yield from road surfaces in response to truck traffic and rainfall, *Weyerhaeuser Research Report*, Weyerhaeuser, Western Forestry Research Center, Centralia, USA, 46 p.

Swift, L.W. (1985) Forest road design to minimize erosion in the Southern Appalachians, *Proceedings of forestry and water quality: a mid-south symposium*, Little Rock, Arkansas, U.S.A., 8-9 maggio 1985.

Swift, L.W. (1988) Forest access roads: design, maintenance, and soil loss, In: Swank, W.T., Crossley, D.A., (a cura di) *Forest hydrology and ecology at Coweeta, Ecological Studies*, Vol. 66. Springer-Verlag, New York, 313-324.

Swanson, F.J., Wemple, B.C. (1998) Effects of forest roads on water and sediment routing, *Ecological Society of America*, Annual Meeting Abstracts 23.

Thomas, R.B., Megahan, W.F. (1998) Peak flow responses to clear-cutting and roads in small and large basins, western Cascades, Oregon: a second opinion, *Water Resources Research*, 34, 3393-3403.

Thompson, J.D., Taylor, S.E., Gazin, J.E., Rummer, R.B., Albright, R.A. (1996) Water quality impacts from low-water stream crossings, *ASAE Paper 96-5015*, St Joseph, USA, American Society of Agricultural Engineers, 15 p.

Tilley, F.B., Rice, R.M. (1977) Caspar Creek watershed study, a current status report, *state Forest Notes n. 66*, California Department of Forestry, U.S.A.

USDA (1998) *A landowener's guide to building forest access roads*, USDA Forest Service Northeastern Area State and Private Forestry, NA-TP-06-98, Radnor PA, USA, luglio 1998.

Vowell, J.L. (1985) Erosion rates and water quality impacts from a recently established forest road in Oklahoma's Ouachita Mountains, In: Blackmon, B.G. (ed.) *Proceedings of forestry and water quality: a mid-South symposium*, Little Rock, Arkansas, USA, 8-9 maggio 1985, 152-163.

Washington Division of Geology and Earth Resources Bulletin 78-1989

Weaver,W.E., Hagans, D.K., Popenoe, J.H. (1995) Magnitude and Causes of Gully Erosion in the Lower Redwood Creek Basin,Northwestern California, In: Nolan, K.M., Kelsey, H.M, Marron, D.C. (a cura di), *Geomorphic Processes and Aquatic Habitat in the Redwood Creek Basin,Northwestern California*, U.S. Geological Survey Professional Paper n. 145, .pp. I1-I21.

Wemple, B.C., Jones, J.A., Grant, G.E. (1996a) Channel network extension by logging roads in two basins, western Cascades, Oregon, *Water Resources Bulletin*, 32, 1195-1207.

Wemple, B.C., Jones, J.A., Grant, G.E., Selker, J.S. (1996b), Runoff generation mechanisms in a steep, forested catchment: controls on flow contributions to a road network, *EOS Transactions American Geophysical Union*, 77(46), F188, Abstract.

Wiest, R.L. (1998) A landowener's Guide to building forest acces roads, *NA-TP-06-98*, Northeastern Area State and private forestry, USDA Forest Service, Radnor, USA.

Whipkey, R.Z. (1965) Subsurface stormflow from forested slopes, *Bulletin of International Association Scientific Hydrology*, 10, 74-85.

Whipkey, R.Z. (1969) Storm runoff from forested catchments by subsurface routes, *International Association Scientific Hydrology, Symposium of Leningrad*, Publication 85, 773-779.

Wright, K.A., Sendek, K.H., Rice, R.M., Thomas, R.B. (1990) Logging effects on streamflow: storm runoff at Caspar Creek in northwestern California, *Water Resources Research*, 26, 1657-1667.

Ziegler, A.D., Giambelluca, T. W. (1997) Importance of rural roads as source area for runoff in mountaineous areas of northern Thailand, *Journal of hydrology*, 196, 204-229.

Ziemer, R.R. (1981) Storm flow response to road building and partial cutting in small streams of northern California, *Water Resources Research*, 17, 907-917.

APPENDICE 1- CALCOLO DELLA PORTATA NEI CORSI D'ACQUA MINORI

Introduzione

La presente appendice si propone di riassumere brevemente i principali metodi a disposizione per il calcolo della portata di piena per gli attraversamenti di piccoli corsi d'acqua e impluvi in ambito agro-silvo-pastorale. Per una più completa rassegna dei metodi per il calcolo della portata al colmo, oltre ai testi di idrologia, è possibile fare riferimento alla Pubblicazione n° 165 del C.N.R (1982).

I metodi esposti possono essere utilizzati per il dimensionamento dei manufatti e degli attraversamenti che interessano la viabilità agro-silvo-pastorale, tenendo però sempre ben presente due aspetti: in genere si tratta di metodi che sono stati sviluppati per bacini che vanno da alcuni km^2 ad alcune decine di km^2, mentre gli impluvi interessati dai manufatti sottendono bacini inferiori. Tali metodi, inoltre, considerano la sola portata liquida, mentre nell'ambiente agro-silvo-pastorale vi può essere un consistente trasporto di materiale detritico e legnoso.

In quest'ultimo caso, è opportuno dimensionare le opere dal punto di vista idraulico con tempi di ritorno più elevati rispetto a quanto sarebbe suggerito dalla loro modesta rilevanza o incrementare l'area del bacino sotteso (Querini, 1989, suggerisce, ad esempio, di aumentare la superficie contribuente di almeno 30%). In genere, viene considerato un tempo di ritorno centennale, anche se per strade temporanee alcuni Autori indicano tempi di ritorno inferiori (Wiest, 1998, propone di utilizzare tempi di ritorno non superiori a 25 anni).

Attraversamenti stradali

Per il dimensionamento degli attraversamenti stradali che sottendono bacini di piccolissime dimensioni (inferiori a 0.5 km^2 o al massimo ad 1 km^2), in letteratura si trovano relazioni che forniscono direttamente la sezione (o il diametro nel caso di tombotti) del manufatto necessaria a smaltire la portata di piena. Nonostante la semplicità e la mancanza di verifiche per l'ambiente italiano, questi metodi possono costituire un utile riferimento per la progettazione delle opere più semplici e gli impluvi minori.

Formula di Talbot

Si tratta di una relazione empirica di largo uso negli U.S.A. e in Canada per il dimensionamento degli attraversamenti stradali (ponti, tombotti, ecc.) dei corsi d'acqua minori. Essa fornisce

direttamente il valore della sezione trasversale del manufatto per una precipitazione critica e per sezioni con velocità inferiori a 3 m/s:

$$\sigma = 0.183\, A^{0.75}\, C\, R$$

con σ sezione del manufatto [m^2], A area sottesa [ha], C [-] coefficiente di deflusso, R [-] coefficiente di riduzione rispetto alla precipitazione di riferimento (101.6 mm/h):

$$R = {i_{cr}}/{101.6}$$

con i_{cr} intensità critica della località.

Il coefficiente di deflusso della formula di Talbot può essere assimilato a quello della formula razionale ed essere valutato nel medesimo modo (si vedano la Tabella XIII e la Tabella XIV)

Metodi basati sulla sezione "a piene rive"

Si tratta di metodi che si basano sul concetto di "*portata formativa*", vale a dire sull'ipotesi che la forma e la geometria di una sezione di un corso d'acqua sia il risultato degli eventi idrologici che si susseguono nel tempo. In effetti, le evidenze geomorfologiche, sebbene non possano dare indicazioni sulla frequenza con cui le portate si verificano, possono risultare anche più affidabili delle consuete formule qualora manchino i più elementari dati di base (o che non sia possibile utilizzarle per motivi di tempo o economicità), come spesso è il caso di piccoli impluvi con bacini contribuenti di modeste dimensioni.

Metodo "California"

Il metodo, utilizzato dal Servizio Foreste della British Columbia (Canada) per il dimensionamento dei tombotti, considera una portata di progetto centennale, da calcolarsi sulla base delle informazioni che possono essere raccolte in campo, basandosi su tre ipotesi:

- la sezione del corso d'acqua è sufficiente a contenere la portata di piena annuale media;
- il rapporto tra la portata di piena annuale media e quella centennale è 3;
- tale portata non viene influenzata dalla pendenza del tombotto, dalla sua scabrezza o da altri fattori.

Sotto queste ipotesi, si può calcolare la sezione del tombotti triplicando la sezione di piena del corso d'acqua. Chiaramente, si tratta d'ipotesi che non rappresentano l'effettiva realtà in tutte le situazioni, ma che sembrano comunque sufficienti nell'ambito dell'accuratezza richiesta per il dimensionamento di tombotti su strade forestali con diametro inferiore a 2 metri e portata di progetto inferiore a 6 m^3/s.

Riassumendo per punti il metodo consiste nel:

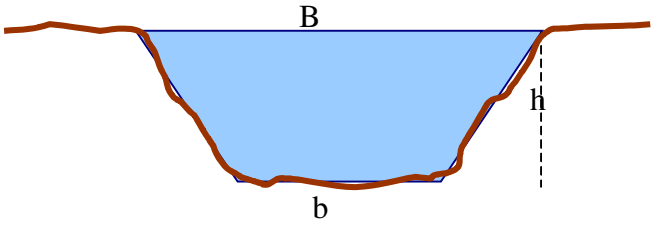
1. rilevare le sezioni relative al livello idrometrico “a piene rive” in diversi punti dell’impluvio;
2. calcolare l’area di ciascuna sezione e identificare l’area media (A);
3. moltiplicare l’area media per 3 (A_{100}= 3 x A);
4. identificare il diametro del tombotto la cui sezione è superiore ad A_{100}.

Es. per un tratto di un impluvio sede di un attraversamento sono state rilevate tre sezioni assimilabili ad un trapezio delle seguenti dimensioni:

1. B = 1.7 m, b = 1.1 m, h = 0.5 m

2. B = 1.8 m, b = 1.4 m, h = 0.4 m

3. B = 1.5 m, b = 0.8 m, h = 0.7 m



Le aree delle tre sezioni sono:

1. A = 0.70 m^2

2. A = 0.64 m^2

3. A = 0.80 m^2

L’area centennale sarà: A_{100}= 3 x 0.71 =2.14 m^2

Il diametro del tombotto dovrà essere superiore a: $d_{100} = \sqrt{\frac{4A_{100}}{\pi}} = 1.65\ m$

Come verifica finale è comunque opportuno confrontare la sezione necessaria a far transitare la portata calcolata con quella dei manufatti gia esistenti nella zona e tenere conto di eventuali segni che possano indicare una dinamica del corso d’acqua differente. In particolare, il progettista dovrà considerare il rischio d’intasamento del manufatto a causa del trasporto di detrito e di legname.

Metodo del “Washington Forest Practice Board”

Il manuale del Dipartimento delle Risorse Naturali dello Stato di Washington (U.S.A.), riporta i valori del diametro di progetto dei tombotti in funzione delle caratteristiche della sezione “a piene rive”; tali caratteristiche sono la larghezza di massima piena e la relativa profondità.

La profondità “a piene rive” è la media delle distanze misurate tra il fondo del corso d’acqua ed un’ipotetica linea che identifica il massimo livello che l’acqua può raggiungere senza esondare o raggiungere i versanti. La larghezza “a piene rive” è data dalla lunghezza della linea immaginaria sopra menzionata. L’identificazione della sezione “a piene rive” in campo non è sempre facile e

Tabella XI: valori diametro di progetto (m) dei tombotti in funzione della larghezza e dell'altezza della sezione "a piene rive" (da Washington State Departement of Natural Resources)

larghezza sezione "a piene rive" (m)	altezza sezione "a piene rive"(m)											
	0.08	**0.15**	**0.23**	**0.30**	**0.38**	**0.46**	**0.53**	**0.61**	**0.69**	**0.76**	**0.84**	**0.91**
0.30	0.38	0.46	0.61	0.76								
0.61	0.61	0.76	0.76	0.91	1.07	1.07	1.22	1.22				
0.91	0.76	0.91	1.07	1.22	1.22	1.22	1.37	1.37	1.37	1.52	1.52	1.52
1.22	0.76	1.07	1.22	1.37	1.37	1.37	1.52	1.52	1.68	1.68	1.83	1.83
1.52	0.91	1.22	1.37	1.37	1.52	1.52	1.68	1.68	1.83	1.83	1.98	1.98
1.83	0.91	1.22	1.37	1.52	1.68	1.68	1.83	1.83	1.98	1.98	2.13	2.13
2.13	1.07	1.37	1.52	1.68	1.83	1.83	1.98	1.98	2.13	2.13	2.29	2.29
2.44	1.07	1.52	1.68	1.83	1.98	1.98	2.13	2.13	2.13	2.29	2.29	2.29
2.74	1.22	1.52	1.68	1.98	1.98	2.13	2.13	2.29	2.29	2.29	2.44	2.44
3.05	1.37	1.68	1.83	1.98	2.13	2.13	2.29	2.29	2.44	2.44	2.44	2.59
3.35	1.52	1.68	1.83	2.13	2.13	2.29	2.29	2.44	2.44	2.59	2.59	2.59
3.66	1.68	1.83	1.98	2.13	2.29	2.29	2.44	2.44	2.59	2.59	2.74	2.74
3.96	1.68	1.98	1.98	2.29	2.29	2.44	2.59	2.59	2.59	2.74	2.74	2.90
4.27	1.83	1.98	2.13	2.29	2.44	2.44	2.59	2.59	2.74	2.74	2.90	2.90
4.57	1.98	2.13	2.29	2.44	2.44	2.59	2.74	2.74	2.74	2.90	2.90	3.05
4.88	1.98	2.13	2.29	2.44	2.59	2.59	2.74	2.74	2.90	2.90	3.05	3.05
5.18	2.13	2.29	2.44	2.59	2.59	2.74	2.90	2.90	2.90	3.05	3.05	3.20
5.49	2.13	2.29	2.44	2.59	2.74	2.74	2.90	2.90	3.05	3.05	3.20	3.20
5.79	2.29	2.44	2.59	2.59	2.74	2.90	2.90	3.05	3.05	3.20	3.35	3.35
6.10	2.44	2.44	2.59	2.74	2.74	2.90	3.05	3.05	3.20	3.20	3.35	3.35

ci si deve basare sia sulle evidenze morfologiche (scarpate, variazioni di pendenza, ecc.), che sulle variazioni di vegetazione e di granulometria del terreno.

I valori proposti da Dipartimento delle Risorse Naturali dello Stato di Washington, riportati in Tabella XI, si basano su una valutazione della portata con Tempo di Ritorno centennale.

Piccoli bacini

La definizione di piccolo bacino non è concorde, anche se in genere si intendono bacini con una superficie contribuente inferiore a 50 km^2 (Direttiva dell'A.d.B. del fiume Po 18/ 2001).

Nel caso dei piccoli bacini, la sopraccitata direttiva indica come metodi per il calcolo della portata due semplici modelli afflussi-deflussi: il metodo razionale e quello del Soil Conservation Service del Dipartimento dell'Agricoltura degli U.S.A.

Nonostante un'altra Direttiva dell'A.d.B. del fiume Po (delibera A.d.B. n.2/99), indichi per gli attraversamenti delle infrastrutture un preciso Tempo di Ritorno (100 anni) e come sopra menzionato il concetto di tempo di ritorno sia molto utile a livello progettuale, nella presente appendice si ritiene comunque utile richiamare anche le relazioni empiriche che forniscono

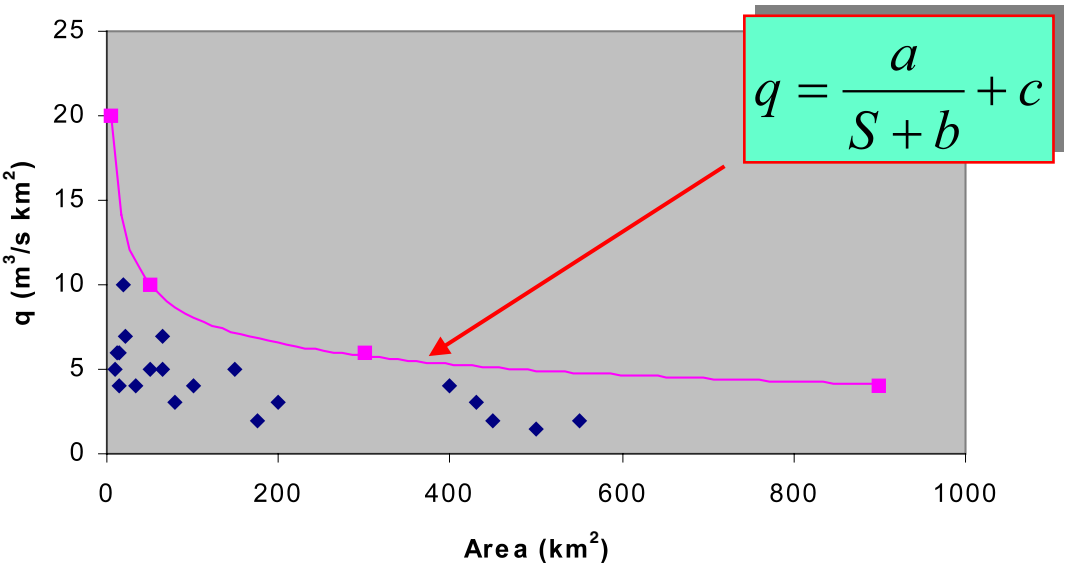


Figura 51: curva di invilupo dei massimi valori di portata in relazione all'area contribuente

semplicemente il valore della portata al colmo senza indicazioni relative alla frequenza d'accadimento.

Relazioni empiriche

Molte delle relazioni empiriche per il calcolo della portata al colmo, derivano dalle curve d'inviluppo delle portate massime registrate in bacini con dimensioni diverse, ma con caratteristiche idrologiche simili (Figura 51), ottenendo relazioni tra portata specifica al colmo e superficie del bacino contribuente. Altre relazioni empiriche, invece, si sforzano di mettere in relazione la portata al colmo con le caratteristiche fisiche del bacino e/o il regime pluviometrico. È bene ricordare che tutte le relazioni empiriche, a rigore, sono da ritenersi valide solamente per i bacini che ricadono nella zona per le quali sono state sviluppate; inoltre, le relazioni d'inviluppo sono state ottenute dalle portate massime registrate in bacini di dimensioni che vanno dalle decine alle centinaia (talvolta migliaia) di km^2. La carenza di dati, tuttavia, fa sì che esse siano impiegate in ogni caso.

Kresnik

$$q_{\max} = \frac{25}{\sqrt{S}} \qquad (\mathrm{m}^3/\mathrm{s\,km}^2) \quad \text{con } S \text{ area contribuente}$$

Kresnik-Valentini (1912)

$$q_{\max} = \frac{27}{\sqrt{S}} \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2}) \quad \text{con } S \text{ area contribuente}$$

Kresnik-EASF (Servizio Federale Svizzero delle Strade e delle Dighe, 1974 per l'alto corso del Ticino)

$$q_{\max} = \frac{42}{\sqrt{S}} \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2})$$

Hofbauer (1916)

$$q_{\max} = \alpha\frac{60}{\sqrt{S}} \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2})$$

$\alpha = 0.5 \div 0.7$

Kresnik

$$q_{\max} = \alpha\frac{32}{0.5+\sqrt{S}} \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2})$$

$\alpha = 0.6 \div 2.0$

Forti (1922)

$$q_{\max} = \alpha\frac{500}{S+125} + \beta \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2}) \qquad \text{con } 22<S<7000\ \mathrm{km^2}$$

$\alpha = 2.35$ e $\beta = 0.5$ per h_{24} 200 mm

$\alpha = 3.25$ e $\beta = 1.0$ per h_{24} 400 mm

secondo De Marchi (1939)

$\alpha = 6.0$ e $\beta = 5.0$ per h_{12} 400 mm, S 150 $\mathrm{km^2}$, Appennino ligure

Giandotti (1940)

$$q_{\max} = \frac{532.5}{S+16.2} + 5 \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2}) \qquad \text{con } 2 < S < 940\ \mathrm{km^2} \text{ (Appenino ligure)}$$

Tournon (1973)

$$q_{\max} = \frac{1500}{S+40} + 3 \qquad (\mathrm{m^3/s\,km^2}) \qquad \text{nubifragi del biellese}$$

Cook

È un metodo elaborato negli U.S.A. per piccoli bacini agro-forestali, che sebbene sia di carattere empirico esprime la portata al colmo in funzione della probabilità di accadimento:

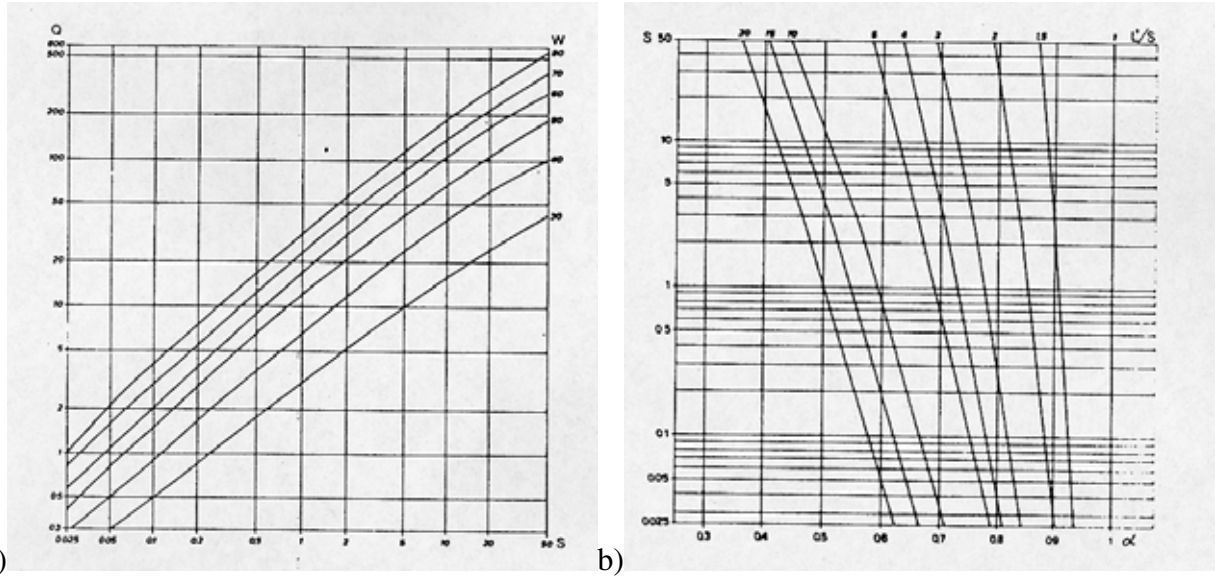
$$Q_{25} = \alpha\bar{h}_A Q' \qquad (\mathrm{m^3/s}) \qquad 0.025 < S < 50\ \mathrm{km^2}$$

con *Q'* portata venticinquennale di prima approssimazione funzione della superficie (km^2) e delle caratteristiche del bacino espresse dal coefficiente *W* (Figura 52a; Tabella XII), α è un coefficiente di forma funzione della superficie *S* e del rapporto adimensionale L^2/S (*L* lunghezza dell'asta principale in km; Figura 52b), $\overline{h}_A$ è l'altezza media annua di pioggia (in m; $\overline{h}_A > 1$ m).

Il metodo prevede anche la possibilità di passare a portate con Tempi di Ritorno differenti attraversi fattori moltiplicativi: Q(10)=0.71 Q(25), Q(50)=1.23 Q(25), Q(100)=1.50 Q(25).

Tabella XII: valori del parametro W *nel metodo di Cook*

Pendenza	>30%	10-30%	5-10%	<5%
	40	30	20	10
Suolo, infiltrazione	Roccia o suolo sottile di scarsa permeabilità	Argilloso o altro suolo a bassa permeabilità	Suoli profondi permeabili	Sabbie, suoli sabbiosi e sciolti ad elevata permeabilità
	20	15	10	5
Copertura vegetale	Assente o sparsa	Da scarsa a discreta per oltre il 90% della superficie del bacino	Da discreta a buona: coltivazioni e vegetazione naturale in ugual misura	Da buona ad eccellente: vegetazione boschiva per oltre il 90% della superficie
	20	15	10	5
Invasi superficiali	Depressioni superficiali scarse e poco profonde e alvei incisi	Rete di drenaggio ben definita senza invasi significativi	Rete estesa, presenza di invasi per meno del 2% della superficie	Presenza di notevoli invasi nella rete idrografica stessa (zone di esondazione) o invasi di grandi dimensioni
	20	15	10	5



a) b)

Figura 52: parameri W *e* α *del metodo di Cook*

Formula razionale

La formula razionale, è una relazione per la valutazione della portata al colmo che transita in una determinata sezione di controllo, per un assegnato tempo di ritorno.

La sua formulazione risale alla fine dell'800 quando è stata sviluppata parallelamente in Paesi diversi; in Italia è stata sviluppata da *Turazza* nel 1880 con il nome di *metodo cinematico* e ripresa da *Visentini* e *Giandotti* negli anni '30.

Nonostante l'idrologia abbia fatto notevoli progressi, è ancora molto utilizzata nella pratica operativa, soprattutto per i piccoli bacini, per la sua semplicità e spesso per la carenza di dati che impediscono l'utilizzo di strumenti più sofisticati.

Prima di analizzare la relazione, è opportuno chiarire alcuni aspetti relativi ad essa:

- valuta la portata al picco e non l'intero idrogramma dei deflussi;
- non simula un evento reale ma un evento di progetto uniforme nello spazio e nel tempo;
- assume che la probabilità di accadimento dell'evento di pioggia e di portata sia la stessa.

Nell'ipotesi di pioggia uniforme nello spazio e nel tempo, la massima portata si avrà quando tutta la precipitazione che cade sulla superficie contribuente, al netto delle perdite, raggiunge la sezione di chiusura in tempo utile per contribuire all'idrogramma di piena. Tale situazione si verifica quando l'intero bacino contribuisce contemporaneamente, quando cioè la precipitazione, costante nel tempo e uniforme nello spazio, ha una durata maggiore o uguale al tempo necessario affinché la precipitazione che cade nel punto idraulicamente più lontano del bacino raggiunga la sezione di controllo; tale tempo è definito tempo di corrivazione e il colmo di piena non aumenta anche nel caso in cui la precipitazione prosegua oltre tale tempo.

La formula razionale assume quindi la forma

$$Q = Ci_{cr}A \qquad [\mathrm{m}^3/\mathrm{s}]$$

dove C è il coefficiente di deflusso (quota di precipitazione che perviene alla sezione di controllo), i_{cr} è l'intensità della precipitazione critica, A è la superficie del bacino.

I valori massimi dell'intensità di precipitazione in un punto diminuiscono con la sua durata secondo una legge di potenza del tipo:

$$h(d) = ad^n$$

la curva descritta dal tale relazione, come è noto, prende il nome di *Linea Segnalatrice di Possibilità Pluviometrica* (L.S.P.P.) ed è ottenuta dall'elaborazione statistica delle massime precipitazioni di data durata registrate alle stazioni pluviografiche per un numero sufficiente di anni (1, 3, 6, 12, 24 ore consecutive riportate sugli Annali Idrologici del Servizio Idrografico e

Mareografico Nazionale). L'elaborazione probabilistica di tali valori consente di esprimere le L.S.P.P. in termini di Tempo di Ritorno, *T*, cioè il numero di anni in cui il valore in media viene superato una sola volta:

$$h(d,T) = a_T d^{n_T}$$

Come precedentemente illustrato, la porta massima si avrà per una precipitazione di durata sufficiente affinché contribuisca l'intero bacino, ma il più breve possibile per avere un'intensità elevata; l'intensità di una tale precipitazione assume la definizione di *intensità critica* (i_{cr}) e si riferisce ad una durata pari al tempo di corrivazione (t_c).

La relazione della portata al colmo (espressa in m^3/s) espressa dalla formula razionale diviene quindi:

$$Q_p(T) = \frac{1}{3.6} C i_{cr}(T) A \quad (m^3/s)$$

con *A* in km^2, *C* adimensionale, i_{cr} in mm/h paria a $i_{cr}(T) = a_T t_c^{\,n_T - 1}$.

In Tabella XV sono riportati i valori dei parametri delle L.S.P.P. contenuti nel PAI dell'A.d.B. del Po per le stazioni della Lombardia.

Per la stima del tempo di corrivazione di un bacino sono state proposte numerose relazioni di tipo empirico in funzione di alcuni parametri morfologici del bacino (superficie, lunghezza e pendenza dell'asta principale, pendenza dei versanti, ecc.).

Tra le numerose relazioni proposte in letteratura se ne riportano alcune:

Ventura (1905) $$t_c = 0.127\sqrt{\frac{A}{i}}$$

Giandotti (1934, 1937) $$t_c = \frac{4\sqrt{A} + 1.5L}{0.8\sqrt{H_m - H_o}}$$

Tournon (1969) $$t_c = 0.396\frac{L}{\sqrt{i}}\left(\frac{A}{L^2}\frac{\sqrt{i}}{\sqrt{i_v}}\right)^{0.72}$$

Pezzoli (1970) $$t_c = 0.055\frac{L}{\sqrt{i}}$$

Puglisi (1978) $$t_c = \frac{6L^{0.67}}{\left(H_{\max} - H_o\right)^{0.33}}$$

Con t_c tempo di corrivazione in ore, *A* superficie del bacino in km^2, L lunghezza dell'asta principale in km, i_v pendenza media dei versanti, i pendenza media dell'asta principale, H_{max}, H_m e H_o rispettivamente l'altezza massima, media e minima del bacino

Le direttive del PAI dell'A.d.B. del f. Po indicano preferenzialmente quella di Giandotti, mentre secondo Caroni (CNR, 1982) non vi sono grosse differenze tra le relazioni sopra menzionate ed i valori osservati sperimentalmente in alcune situazioni (Merlo, 1973; Puglisi e Zanframundo, 1978). In generale, tuttavia, per le relazioni che esprimono il tempo di corrivazione vale quanto

detto per le relazioni a carattere empirico sulla validità al di fuori dell'ambito per le quali sono state sviluppate.

Per quanto riguarda il coefficiente di deflusso, esso rappresenta il rapporto tra la portata in ingresso al bacino a seguito della precipitazione e la portata al picco e tiene conto delle perdite per immagazzinamento superficiale, per infiltrazione e dei meccanismi di ritardo nella rete idrografica.

Per la sua valutazione, è possibile ricorrere alle tabulazioni riportate in diversi manuali di idrologia; a tale proposito si riportano i valori contenuti nelle direttive del PAI (Tabella XIII) e quelli riportati da Benini (1990), in cui *C* è espresso in funzione della morfologia, dell'uso del suolo e del tipo di terreno (Tabella XIV).

Tabella XIII:Coefficienti di deflusso suggeriti dal PAI (raccomandati da Handbook of Applied Hydrology, Ven Te Chow, 1964)

	Uso del suolo	
Tipo di suolo	**Coltivato**	**Bosco**
Suolo con infiltrazione elevata, normalmente sabbioso o ghiaioso	0.20	0.10
Suolo con infiltrazione media, senza lenti argillose;suoli limosi e simili	0.40	0.30
Suolo con infiltrazione bassa, suoli argillosi e suoli con lenti argillose vicine alla superficie, strati di suolo sottile al di sopra di roccia impermeabile	0.50	0.40

Tabella XIV: valori del coefficiente C in funzione delle caratteristiche del bacino (da Benini, 1990)

Tipo di suolo	Coltivazioni	Pascoli	Boschi
Suoli molto permeabili sabbiosi o ghiaiosi	0.20	0.15	0.10
Suoli mediamente permeabili (senza strati di argilla) e terreni di medio impasto o simili	0.40	0.35	0.30
Suoli poco permeabili, suoli fortemente argillosi o simili, con starti di argilla vicino alla superficie, suoli poco profondi sopra roccia impermeabile	0.50	0.45	0.40

Tabella XV: valori dei parametri delle L.S.P.P. contenuti nel PAI per le stazioni della Lombardia

	Stazione di misura	**T**	**=20**	**T**	**=100**	**T**	**=200**	**T**	**=500**
Cod.	**Denominazione**	**a**	**n**	**a**	**n**	**a**	**n**	**a**	**n**
735	Bezzecca	40.57	0.361	53.00	0.352	58.32	0.349	65.32	0.346
747	Salo'	46.17	0.325	59.55	0.317	65.27	0.315	72.81	0.312
750	Peschiera Del Garda	46.05	0.238	59.19	0.231	64.79	0.229	72.19	0.227
755	Monzambano	44.76	0.193	56.88	0.185	62.05	0.183	68.88	0.180
758	Mantova	45.62	0.195	58.37	0.190	63.84	0.188	71.17	0.187
764	Ghedi	41.67	0.236	52.20	0.231	56.70	0.230	62.63	0.228
765	Calvisano	53.26	0.198	69.94	0.186	77.07	0.182	86.49	0.178
775	Edolo	28.26	0.386	36.07	0.372	39.40	0.368	43.81	0.363
781	Lago D'arno	33.53	0.431	42.91	0.422	46.91	0.419	52.19	0.415
787	Breno	35.07	0.298	43.39	0.293	47.38	0.288	51.61	0.290
807	Borgonato	45.71	0.248	58.13	0.241	63.45	0.239	70.44	0.236
816	Chiari	51.06	0.254	64.19	0.256	69.78	0.257	77.18	0.258
818	Orzinuovi	48.98	0.201	64.19	0.180	70.71	0.173	79.39	0.165
822	Memmo	39.18	0.435	49.82	0.439	54.35	0.440	60.33	0.442
836	Bozzolo	58.86	0.222	76.72	0.212	84.36	0.208	94.43	0.205
845	Gaver	31.47	0.488	39.32	0.484	42.70	0.483	47.16	0.481
865	S.Matteo Chiaviche	38.86	0.257	49.46	0.246	53.99	0.243	59.96	0.239
867	Cremona	52.31	0.235	68.63	0.225	75.59	0.222	84.78	0.218
869	Pieve S.Giacomo	52.12	0.240	68.85	0.234	75.95	0.232	85.43	0.230
873	Casalmaggiore	40.01	0.290	49.91	0.298	54.14	0.300	59.71	0.303
878	Lago Cancano	18.01	0.576	22.16	0.588	23.93	0.592	26.26	0.596
886	S.Caterina Valfurva	19.14	0.524	23.49	0.530	25.35	0.533	27.80	0.535
888	Bormio	15.81	0.527	19.42	0.533	20.93	0.535	22.97	0.537
889	Fusine	21.75	0.384	28.77	0.365	31.79	0.359	35.76	0.353
892	Tirano	34.96	0.225	45.31	0.206	49.73	0.200	55.56	0.193
913	Scais	34.64	0.571	43.54	0.577	47.38	0.578	52.34	0.580
914	Campo Moro	22.69	0.447	28.80	0.440	31.49	0.438	35.02	0.436
915	Lanzada	22.41	0.443	28.25	0.431	30.74	0.428	34.03	0.423
944	Valle Ratti	38.53	0.347	48.60	0.340	52.89	0.339	58.56	0.336
949	Dongo	50.98	0.353	65.29	0.349	71.41	0.347	79.47	0.346
953	Introbio	55.36	0.327	72.36	0.316	79.63	0.313	89.21	0.309
956	Como	55.27	0.275	70.02	0.270	76.32	0.269	84.63	0.267
986	San Martino De Calvi	45.50	0.372	55.85	0.367	60.26	0.365	66.13	0.363
1005	Treviglio	57.28	0.202	77.09	0.186	84.34	0.180	95.05	0.175
1016	Gorno	62.02	0.336	78.94	0.333	86.17	0.332	95.72	0.331
1021	Bergamo	48.65	0.239	62.40	0.225	68.27	0.220	76.02	0.215
1029	Codogno	52.36	0.177	68.50	0.156	75.32	0.150	84.40	0.143
1031	Asso	60.13	0.345	75.68	0.342	82.24	0.342	90.97	0.341
1035	Costa Masnaga	68.18	0.302	89.06	0.306	97.97	0.307	109.73	0.308
1037	Carate Brianza	57.58	0.293	73.95	0.289	80.93	0.288	90.11	0.287
1045	Varese	64.47	0.280	82.06	0.267	89.56	0.263	99.48	0.258
1057	Busto Arsizio	67.72	0.207	89.18	0.190	98.27	0.184	110.38	0.178
1059	Marcallo	52.83	0.261	67.73	0.250	74.09	0.246	82.49	0.242
1080	Canobbio	61.36	0.424	77.78	0.429	84.82	0.430	94.14	0.432
1083	Lago Delio	53.30	0.447	67.65	0.455	73.77	0.458	81.84	0.460
1095	Laveno Ponte Tresa	47.19	0.375	58.77	0.374	63.72	0.373	70.24	0.373

APPENDICE 2 - CLASSIFICAZIONE DEI TERRENI USCS (UNIFIED SOIL CLASSIFICATION SYSTEM)

Simbolo del gruppo	Denominazioni tipiche
Terreni a grana grossolana (più del 50% è costituito da particelle con diametro > di 75 μm)	
GW	ghiaie ben classate, miscele di ghiaia e sabbia, senza o con poco fine
GP	ghiaie mal classate, miscele di ghiaia e sabbia, senza o con poco fine
GM	ghiaie limose, miscele di ghiaia-sabbia-limo mal classate
GC	ghiaie argillose, miscele di ghiaia-sabbia-argilla mal classate
SW	sabbie ben classate, sabbie ghiaiose, senza o con poco fine
SP	sabbie mal classate, sabbie ghiaiose, senza o con poco fine
SM	sabbie limose, miscele di sabbia e limo mal classate
SC	sabbie argillose, miscele di sabbia e argilla mal classate
Terreni a grana fine (più del 50% è costituito da particelle con diametro < di 75 μm)	
ML	limi inorganici e sabbie molto fini, sabbie fini limose o argillose di bassa plasticità, terreni limosi o sabbiosi fini
CL	argille inorganiche di plasticità da media a bassa, argille ghiaiose, argille sabbiose, argille limose; argille "magre"
OL	limi organici e argille limose organiche di bassa plasticità
MH	limi inorganici, terreni sabbiosi (sabbie fini) o limosi micacei, limi "elastici"
CH	argille inorganiche di elevata plasticità; argille "grasse"
OH	argille organiche di plasticità da media ad elevata
Terreni ad alto contenuto di sostanza organica	
Pt	torbe e altri terreni ricchi di materia organica

Casi particolari:

- termini doppi: i terreni con caratteristiche a cavallo di due gruppi vengono designati con i simboli di entrambi i gruppi. Ad esempio: GW-GC, GP-GM, etc. necessari qualora la % di fini sia compresa tra il 5 ed il 12%, o per intervalli particolari della carta di plasticità;

***- termini di confine**: da adottare per terreni le cui proprietà variano in modo tale da non consentire una precisa identificazione in un singolo gruppo (CL/CH, SC/CL, GM/SM, etc.). Per esempio quando la percentuale dei fini varia tra 45% e 55% (es.: GM/ML, CL/SC) o quando la percentuale di sabbia e di ghiaia varia tra il 45% ed il 55% (es.: GP/SP, SC/GC, GM/SM, etc.) mentre è difficile avere un simbolo del tipo GW/SW; nel caso di difficile distinzione tra limo e argilla, specie in campagna, potremo avere: CL/ML, CH/MH, SC/SM così come quando sarà difficile distinguere tra terreni molto o poco compressibili: CL/CH, MH/ML. In genere le sigle saranno ordinate in funzione della frequenza e importanza con cui altri terreni sono stati classificati in prossimità delle aree dubbie.*

APPENDICE 3 - TERMINI DELLA LEGENDA DELLA CARTA LITOLOGICA ALLA SCALA 1:10.000 (CARTOGRAFIA GEOAMBIENTALE, REGIONE LOMBARDIA)

Simbolo	Descrizione
	Rocce Ignee
IA	rocce intrusive acide
IB	rocce intrusive basiche
EA	rocce effusive acide
EB	rocce effusive basiche
FL	rocce filoniane
	Rocce sedimentarie
Ac	arenaria massiccia o stratificata ben cementata
As	arenaria poco cementata
Al	argillite
Fl	flysch
Am	argille e marne con livelli e lenti arenacei e/o calcarei
Cm	calcare massiccio e stratificato in grossi banchi
Cs	calcare mediamente e sottilmente stratificato, non selcifero
Cn	calcare selcifero
Dm	dolomia massiccia o stratificata
Mc	marna e marna calcarea
Ss	roccia sedimentaria silicea
	Rocce Metamorfiche
GN	gneiss
FD	filladi e argilloscisti
MQ	micascisti
SR	serpentiniti e altre rocce ultramafiche
MC	rocce metamorfiche carbonatiche