



## **LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO GEOLOGICO LUNGO LE INFRASTRUTTURE VIARIE**

**Maurizio Crispino**

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento  
Politecnico di Milano – P.zza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 – Milano – Italy

Tel: +39.02.2399.6704

Fax: +39.02.2399.6720

E-mail: [crispino@mail.dstm.polimi.it](mailto:crispino@mail.dstm.polimi.it)

**Paola Gattinoni**

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento  
Politecnico di Milano – P.zza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 – Milano – Italy

Tel: +39.02.2399.6662

Fax: +39.02.2399.6662

E-mail: [gattinoni@mail.dstm.polimi.it](mailto:gattinoni@mail.dstm.polimi.it)

**Monica Papini**

Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento  
Politecnico di Milano – P.zza Leonardo da Vinci, 32 – 20133 – Milano – Italy

Tel: +39.02.2399.6662

Fax: +39.02.2399.6662

E-mail: [papini@mail.dstm.polimi.it](mailto:papini@mail.dstm.polimi.it)

# **LINEE GUIDA PER LA VALUTAZIONE DEL RISCHIO GEOLOGICO LUNGO LE INFRASTRUTTURE VIARIE**

**MAURIZIO CRISPINO** - Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento – Politecnico di Milano

**PAOLA GATTINONI** - Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento – Politecnico di Milano

**MONICA PAPINI** - Dipartimento di Infrastrutture, Idraulica, Ambiente e Rilevamento – Politecnico di Milano

## **SOMMARIO**

Le vie di comunicazione che si snodano lungo le rive dei laghi prealpini hanno di norma la caratteristica comune di svilupparsi a ridosso di pareti rocciose piuttosto ripide, sovente caratterizzate da elevata franosità. Sono di recente cronaca i numerosi fenomeni di franamento che interessano a più riprese le strade italiane, franamenti che, oltre a causare talora delle vittime, interrompono la viabilità per lunghi periodi di tempo, procurando notevoli disagi al traffico locale e talvolta impedendo la movimentazione e lo spostamento dei mezzi di soccorso. Ecco quindi che diventa sempre più rilevante la necessità di elaborare delle carte in grado di evidenziare, con precisione, le aree più soggette a rischio di frane in modo tale che tempestivamente queste possano essere messe in sicurezza, salvaguardando una viabilità che già spesso è in crisi a causa dell'elevato traffico. Inoltre, anche le recenti norme legislative (Legge 267/98) impongono l'individuazione e la delimitazione sul territorio delle aree soggette a rischio geologico (frane ed esondazioni dei corsi d'acqua) per procedere ad una rapida messa in sicurezza delle zone a più elevata instabilità.

In tale contesto, in questo studio sono presentate alcune linee guida per la valutazione del rischio geologico lungo un'infrastruttura stradale. Dopo aver fornito una dettagliata descrizione delle stesse, viene presentata la loro articolazione in fasi nonché i risultati a cui, tramite ciascuna fase, è possibile pervenire. Nell'articolo viene altresì presentata un'applicazione delle stesse linee guida al caso della Strada Statale Lariana n° 583 (Lecco-Bellagio, LC), che si sviluppa lungo la sponda occidentale del Lario lecchese, dove si sono verificate, anche recentemente, delle cadute di massi che hanno causato problemi di rilevante importanza sia alla sicurezza della viabilità che al traffico locale.

## **ABSTRACT**

The roads along prealpine lakes are often interested by steep slopes, sometimes characterized by high instability. Recently, some landslides have involved italian roads, causing victims and the road closure for long time. In this situation, also the aids are very difficult. For this reason, the drawing up of the geological risk maps is important to put in safety the roads, safeguarding a practicability that often is already in crisis because of the high traffic volume.

Moreover, the recent italian laws impose the identification of the geological risk areas in order to put in safety the zones characterized by higher instability. In this paper, some guide-lines for geological risk assessment along roads are presented. First, a detailed report of these guide-lines is presented. Afterwards, an application of the same to the

Strada Statale Lariana n.583, where some rock falls recently caused problems to the local traffic, is discussed.

## **1. PREMESSA**

Una delle problematiche più frequenti che si riscontrano lungo un asse stradale, sia esso in fase di costruzione sia in esercizio, riguarda il potenziale sviluppo di instabilità dei versanti, le quali possono, da un lato, compromettere la viabilità e, dall'altro, costituire un vero e proprio rischio per l'incolumità degli utenti. Per tale ragione, l'attenzione di ricercatori e pubbliche amministrazioni in questi ultimi anni si è rivolta, con un crescente interesse, alla messa a punto di metodologie per la valutazione del rischio geologico, senza peraltro applicare in modo specifico tali metodologie alla progettazione e gestione delle infrastrutture viarie.

Le problematiche sopra citate interessano in particolare modo le vie di comunicazione che si snodano su tracciati prealpini o lungo le rive dei laghi. Essi infatti hanno di norma la caratteristica comune di svilupparsi a ridosso di pareti rocciose piuttosto ripide, sovente caratterizzate da elevata franosità. Sono di recente cronaca i numerosi fenomeni di franamento che interessano a più riprese le strade italiane, franamenti che, oltre a causare talora delle vittime, interrompono la viabilità per lunghi periodi di tempo, procurando notevoli disagi al traffico locale. Ecco quindi che diventa sempre più rilevante la necessità di elaborare delle carte in grado di evidenziare, con una certa precisione, le aree più soggette a rischio di frane in modo tale che tempestivamente queste possano essere messe in sicurezza, salvaguardando una viabilità che già spesso è in crisi a causa dell'elevato traffico.

Viene in tal modo garantita anche la funzionalità di quelle vie di collegamento che non dispongono di tracciati alternativi. Di fatto, anche le recenti norme legislative (Legge 267/98) impongono l'individuazione e la delimitazione sul territorio delle aree soggette a rischio geologico (frane ed esondazioni dei corsi d'acqua) per procedere ad una rapida messa in sicurezza delle zone a più elevata instabilità, definite come zone di prioritario intervento.

Alla luce di quanto detto, scopo del presente studio è fornire alcune linee guida per la valutazione del rischio geologico applicabili in modo specifico lungo un tracciato stradale. A titolo di esempio, si illustra l'applicazione della metodologia di lavoro proposta ad un caso reale riguardante la Strada Statale Lariana n° 583 (Lecco-Bellagio, LC). Lo studio si inserisce in un progetto di ricerca a più ampio respiro finalizzato alla messa a punto di metodologie per l'analisi del rischio geologico, in grado di fornire un supporto per la redazione di Piani di Protezione Civile.

## **2. LO STATO DELL'ARTE SUL RISCHIO GEOLOGICO**

Prima di descrivere la metodologia messa a punto inerente la valutazione del rischio geologico lungo un tracciato stradale, si ritiene opportuno fare una nota introduttiva riguardante la definizione di rischio, ai fini di una migliore comprensione delle problematiche in esame.

In generale, il rischio geologico può essere definito come il valore atteso delle perdite umane, dei feriti, dei danni alle proprietà e delle perturbazioni alle attività economiche dovuti ad un particolare fenomeno naturale, quale ad esempio frane, valanghe, esondazioni, ecc.; tale rischio è espresso in termini di costo annuo oppure di numero o quantità di unità perse per anno:

$$R = H*V*W$$

dove:

- H è la pericolosità (sinonimo di hazard, probabilità di occorrenza), cioè la probabilità che un fenomeno potenzialmente distruttivo di determinata intensità si verifichi in un dato periodo di tempo ed in una data area, espressa in termini di probabilità annua (o di tempo di ritorno) e riferita ad una determinata intensità del fenomeno;
- V è la vulnerabilità, cioè il grado di perdita prodotto su un certo elemento o gruppo di elementi esposti a rischio risultante dal verificarsi di un fenomeno naturale di una data intensità, espressa in una scala da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale) e funzione dell'intensità del fenomeno e della tipologia di elemento a rischio;
- W è il valore degli elementi a rischio, cioè il valore economico o numero di unità relative ad ognuno degli elementi a rischio in una data area e si esprime in termini di numero o quantità di unità esposte (es.: numero di persone, ettari di terreno agricolo) oppure in termini monetari.

Per determinare il rischio geologico connesso alla franosità dei versanti esistono in letteratura differenti metodologie; tra le più utilizzate si ricordano il metodo Zermos [1, 2, 3] ed il Rock Engineering System [4, 5]. Esistono inoltre delle metodologie (quali le Classificazioni geomeccaniche di Barton [11], Bieniawski [12], ecc.) che, anche se non consentono di definire il rischio geologico in senso stretto, forniscono degli elementi utili per valutare il grado di pericolosità di una particolare area attraverso la determinazione della qualità degli ammassi rocciosi, in termini di caratteristiche geomeccaniche.

Recentemente anche la Regione Lombardia, in adempimento ai dettami legislativi, ha proposto una procedura speditiva per la valutazione del rischio geologico in funzione delle differenti tipologie di dissesto [6]. Tale procedura fornisce degli standard di lavoro in grado di rendere uniformi i metodi di raccolta e di analisi dei dati inerenti i dissesti.

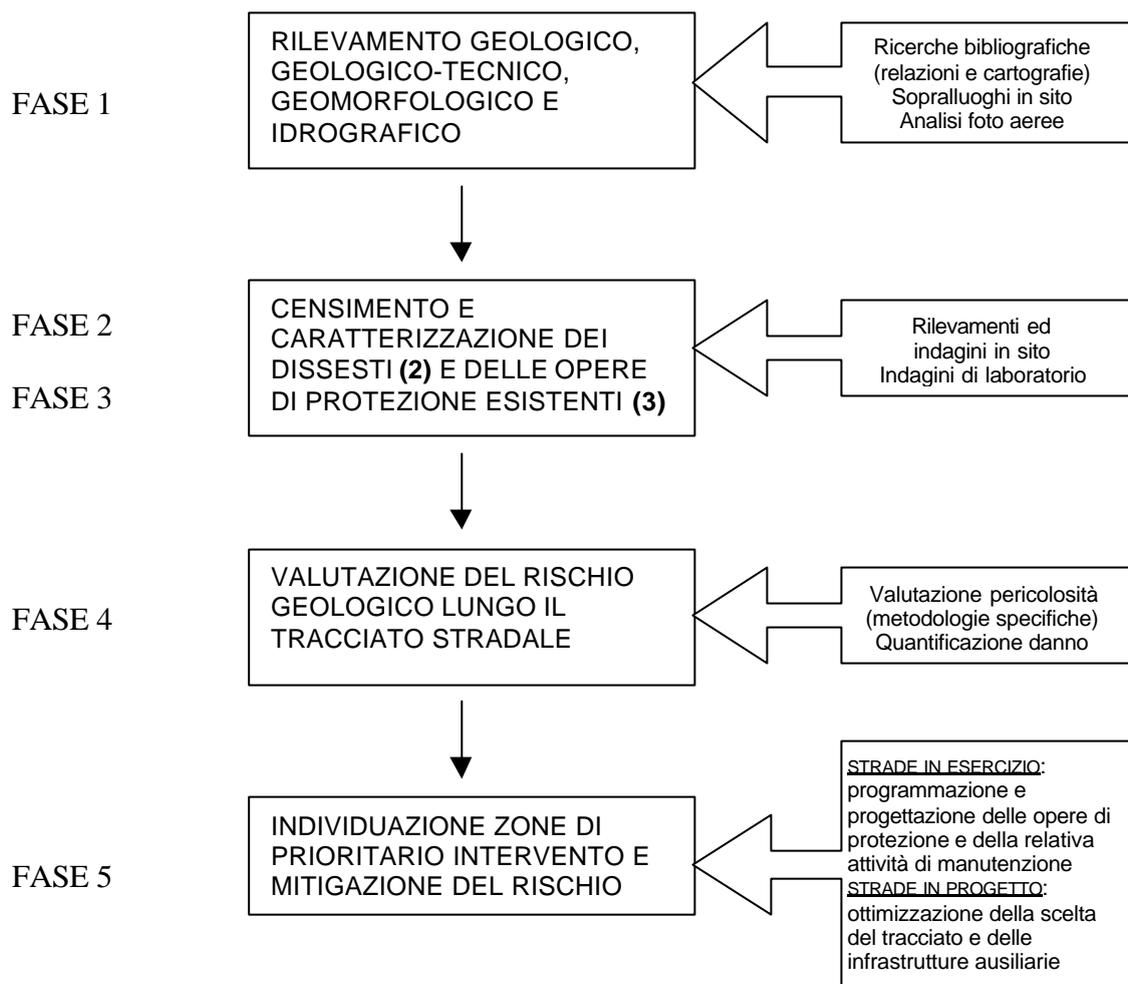
Le metodologie sopra citate, per quanto rigorose e scientificamente valide, non prevedono però un'applicazione specifica ad opere di ingegneria civile quali ad esempio strade e ferrovie; pertanto si è sentita l'esigenza di mettere a punto delle linee guida in grado di fornire ai tecnici e agli Enti che operano sul territorio uno strumento flessibile utile alla progettazione e gestione delle infrastrutture viarie, tenendo conto delle loro interazioni con il territorio circostante.

### **3. LINEE GUIDA**

#### **3.1 Aspetti metodologici generali**

Come si è già avuto modo di sottolineare, lo scopo di questo studio è quello di individuare ed integrare tra loro differenti metodologie di analisi del rischio che, da un lato, siano idonee al contesto territoriale che interessa tipicamente un'infrastruttura viaria e, dall'altro, costituiscano un valido strumento nella scelta e gestione progettuale degli interventi di mitigazione. L'iter procedurale proposto si snoda attraverso un processo multifase (fig. 1) che, partendo da un'approfondita conoscenza del territorio e dei fenomeni da studiare, conduce ad una perimetrazione delle aree a rischio nel contempo accurata e oggettiva, fino a giungere alla scelta degli interventi di messa in sicurezza nell'ottica di una corretta pianificazione e gestione del territorio.

Nel seguito vengono illustrate le diverse fasi di cui si compone il metodo proposto, descrivendone obiettivi e strumenti di analisi.



**Figura 1 - Iter procedurale per la valutazione e la prevenzione del rischio geologico lungo un tracciato stradale.**

FASE 1: inquadramento generale e analisi bibliografia esistente

Il punto di partenza fondamentale per una corretta perimetrazione delle aree a rischio geologico e idrogeologico lungo un tracciato stradale consiste nella reale conoscenza del territorio da studiare. A tal fine, devono essere individuate le caratteristiche geologiche, geologico-tecniche, geomorfologiche ed idrografiche della zona, sulla base delle informazioni tratte dalla bibliografia specifica (eventuale cartografia geologica in scala adeguata alle dimensioni dell'area in esame) e da eventuali sopralluoghi in sito. Lo studio geologico-tecnico deve, inoltre, essere integrato dall'esame stereoscopico delle foto aeree della zona; in questo modo è possibile ricavare una visione d'insieme dei fenomeni presenti nell'area e rilevare particolari strutture tettoniche e morfologiche che altrimenti potrebbero sfuggire.

L'esito di tali ricerche si concretizza in una o più relazioni di inquadramento, con rappresentazioni cartografiche e sezioni geologiche allegate.

FASE 2: censimento dei dissesti esistenti

Il secondo passo consiste nell'identificazione in sito dei fenomeni di instabilità in atto o quiescenti, da integrare con una ricerca bibliografica sugli eventi verificatesi in passato. Le condizioni di instabilità presente o potenziale sono valutabili attraverso il

riconoscimento di indizi di movimento già avvenuto o di condizioni geologiche, morfologiche, strutturali ed idrogeologiche favorevoli al suo innesco.

Per ognuno dei dissesti censiti occorre specificare la tipologia, le cause predisponenti e scatenanti e le principali caratteristiche geotecniche o geomeccaniche del materiale coinvolto. Tali informazioni possono essere acquisite attraverso sopralluoghi sistematici nelle aree instabili, eventualmente da integrare con prove in sito (sondaggi, prove penetrometriche, ecc.) e di laboratorio (tradizionali prove geotecniche e geomeccaniche atte a caratterizzare il comportamento tenso-deformativo dei materiali coinvolti nel franamento).

I risultati così ottenuti possono essere efficacemente gestiti tramite l'impiego di Sistemi Informativi Territoriali, così da avere a disposizione uno strumento flessibile per la rappresentazione, la gestione e l'elaborazione di informazioni georeferenziate.

### FASE 3: censimento delle opere di protezione

Una volta individuate le problematiche geologiche e i principali dissesti che interessano il tracciato stradale, è necessario che vengano identificate le infrastrutture ausiliarie e le opere di difesa eventualmente presenti (reti paramassi, reti in aderenza, muri di controripa, di sottoscarpa, tombini, ecc.) con il relativo stato di efficienza e di manutenzione.

Appare evidente come questa fase debba preferibilmente essere condotta da personale tecnico che si occupa in modo specifico di opere stradali.

### FASE 4: valutazione del rischio geologico

Dopo aver effettuato il rilevamento dell'esistente, è possibile procedere alla valutazione del rischio geologico vero e proprio tramite l'applicazione di metodologie specifiche per le differenti tipologie di dissesto rilevate durante la seconda fase.

E' bene ricordare a questo proposito che una valutazione rigorosa del rischio geologico dovrebbe fare riferimento alla definizione fornita nel precedente paragrafo, tenendo conto sia della pericolosità sia del danno causato dall'evento franoso. Per quanto concerne la valutazione della pericolosità, cioè della probabilità di accadimento in funzione dell'intensità del fenomeno (che dipende sostanzialmente da volume e velocità), andrebbe valutata sulla base di ricerche storiche o in relazione al tempo di ritorno dell'evento (per esempio meteorico) in grado di scatenare il dissesto. Per quanto concerne invece la stima del danno, il problema è interdisciplinare e riguarda aspetti di natura politica, sociale, economica, ecc. e pertanto occorre avvalersi di differenti figure professionali che operano in tali ambiti.

Dal momento che, come detto in precedenza, la scelta della metodologia per la valutazione del rischio dipende dalle problematiche riscontrate, è necessario svolgere a priori uno screening dei dissesti, individuando i metodi di analisi più appropriati. In generale, le tipologie di dissesto che più frequentemente si riscontrano lungo la rete stradale della zona prealpina sono da ricondursi a fenomeni di crollo in roccia e a colate detritiche. Per le loro peculiari caratteristiche tali dissesti interagiscono fortemente con la sede stradale, causando forti disagi agli utenti della strada se non addirittura provocando vittime.

In tale contesto, è opportuno evidenziare che vi sono delle difficoltà nell'individuazione delle aree di transito ed accumulo del materiale in frana. Tali difficoltà condizionano fortemente la stima del rischio e sono strettamente connesse alla tipologia degli elementi a rischio e del fenomeno di dissesto. In particolare, si osserva che nella valutazione del

rischio geologico lungo un'infrastruttura viaria il problema è tipicamente di tipo lineare (corridoi) ed è quindi necessario variare linearmente da punto a punto i valori dei fattori di rischio considerati (ad esempio, considerando una probabilità di accadimento del fenomeno costante per unità di lunghezza dell'opera) (Fig.2). La stima del danno per problemi lineari (fig. 3) di questo tipo deve necessariamente fare riferimento ai seguenti aspetti:

- importanza dell'arteria stradale o della linea ferroviaria;
- frequenza e durata dei passaggi ed intensità del traffico, anche in relazione alla funzione svolta nell'ambito del territorio attraversato;
- tipo di mezzi o convogli (merci, passeggeri, lunghezza, velocità, ecc.);
- individuazione condizioni peggiori: direzione di percorrenza, angolo visuale, dimensione blocchi e loro visibilità, tempo di reazione e di arresto del mezzo, spazio di scarto;
- danni al fondo stradale o alla linea, a impianti tecnologici;
- limiti imposti di velocità;
- impatto con il mezzo o arresto lungo la linea.

#### FASE 5: mitigazione del rischio

La valutazione del rischio geologico lungo un'infrastruttura viaria è necessariamente finalizzata alla gestione e mitigazione del rischio stesso. Tale obiettivo può essere raggiunto tramite una programmazione del territorio sensibile alle problematiche ambientali (in particolare in riferimento alla progettazione di nuove infrastrutture di trasporto) e attraverso l'ottimizzazione della scelta degli interventi di sistemazione (ad esempio con l'applicazione di metodologie quali l'analisi multicriteria, che contribuiscono alla razionalizzazione ed alla trasparenza del processo decisionale).

Ovviamente, quest'ultima fase dello studio si differenzia a seconda che il tracciato stradale in esame sia in fase di progetto di fattibilità, in fase di progetto esecutivo oppure già in esercizio. Nel primo caso, a livello di progetto di fattibilità, è necessario eseguire la valutazione del rischio geologico su un corridoio (fascia ampia qualche km), così da individuare il tracciato ottimale (nel caso specifico, quello che minimizza il rischio). Se, invece, si opera a livello di progetto esecutivo, essendo il tracciato stradale stabilito a priori, il progettista deve utilizzare i risultati dell'analisi del rischio per ottimizzare la scelta delle soluzioni progettuali da adottare (ad esempio, individuando i tratti che necessitano la realizzazione di viadotti e la relativa luce, la necessità e l'ubicazione di eventuali gallerie artificiali e, in generale, tutti quegli interventi atti alla protezione della sede stradale ed alla mitigazione del rischio).

Qualora il tracciato stradale in esame sia invece esistente, la cartografia del rischio ottenuta dall'integrazione delle fasi di studio precedentemente descritte costituisce un valido strumento per l'individuazione delle zone di prioritario intervento e per la gestione degli interventi di manutenzione.

In ogni caso, la scelta degli interventi di sistemazione dei versanti e di protezione della sede stradale è fortemente condizionata dalla tipologia e dalla dimensione dei dissesti riscontrati lungo il tracciato. Per questo motivo, si preferisce demandarne la trattazione ai paragrafi successivi, in cui si analizzeranno con maggiore dettaglio le procedure specifiche per alcuni tra i più frequenti fenomeni di instabilità.

Infine, è bene ricordare che qualsiasi intervento di sistemazione, per quanto imponente, non sarà mai in grado di annullare il rischio, ma dovrà almeno mitigarlo. Il problema si trasforma quindi da tecnico a politico, in quanto diventa necessario definire una soglia

di rischio accettabile, in relazione a criteri socioeconomici che includono un'analisi dei costi, dei danni e della probabilità di accadimento dell'evento calamitoso.

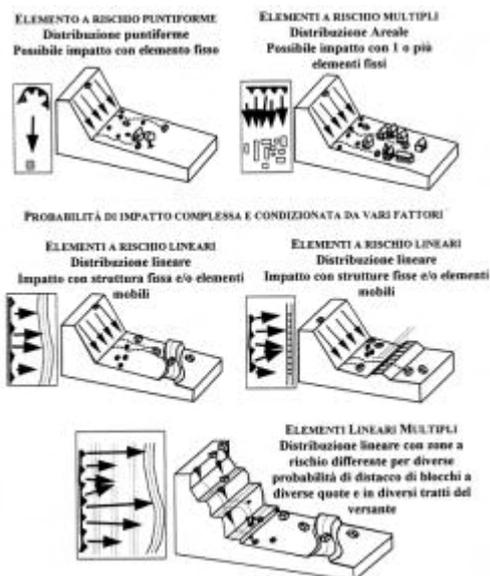


Figura 2 - Tipologia di elementi a rischio e relativa probabilità di impatto [13]

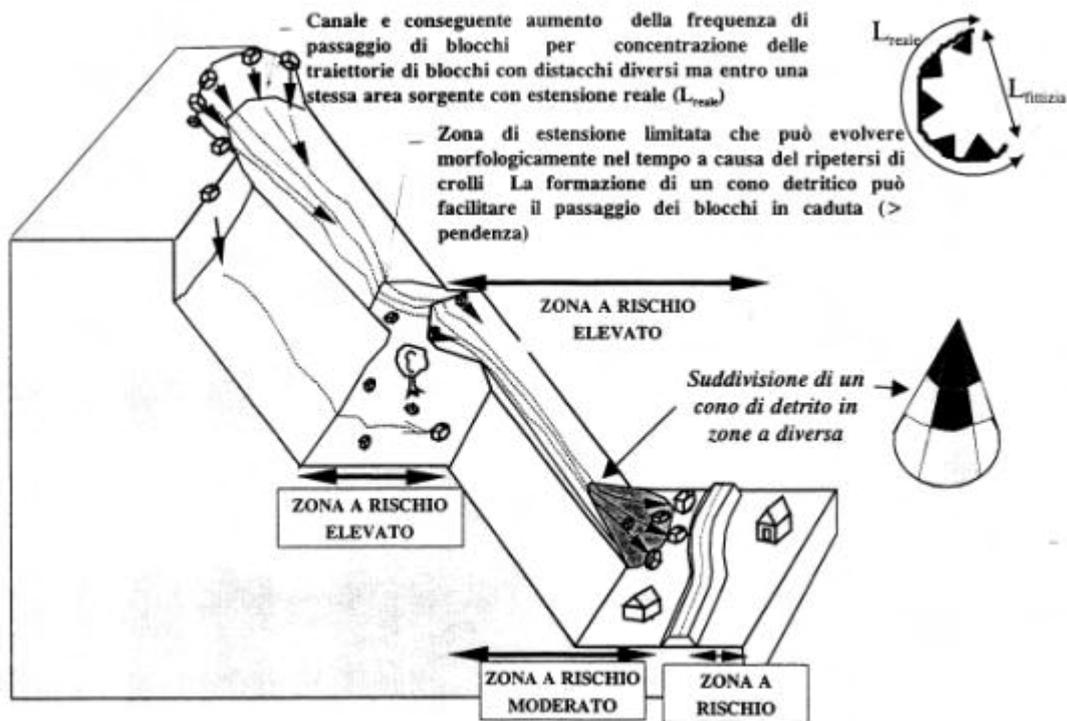


Figura 3 - Probabilità di impatto in presenza di un elemento a rischio di tipo lineare [13]

### **3.2 Applicazione al caso dei crolli in roccia**

Se lungo l'asse stradale sono presenti pareti rocciose aggettanti (individuate nella fase 1), è necessario in primo luogo procedere al censimento delle aree potenzialmente interessate dal crollo di blocchi (fase 2). In tali aree si effettua un rilevamento geologico-strutturale di dettaglio, indispensabile per valutarne l'effettiva propensione al dissesto ed un censimento delle opere di difesa già presenti lungo l'infrastruttura viaria (fase 3).

La valutazione della pericolosità (fase 4) può essere condotta, ad esempio, tramite l'impiego del Rock Engineering System [4], una metodologia di approccio matriciale a tutti i problemi coinvolgenti la meccanica delle rocce. L'obiettivo del metodo è quello di definire un indice di instabilità potenziale degli ammassi rocciosi (Rock Mass Instability Index – RMII [5]), in grado di fornire un quadro completo della situazione del versante.

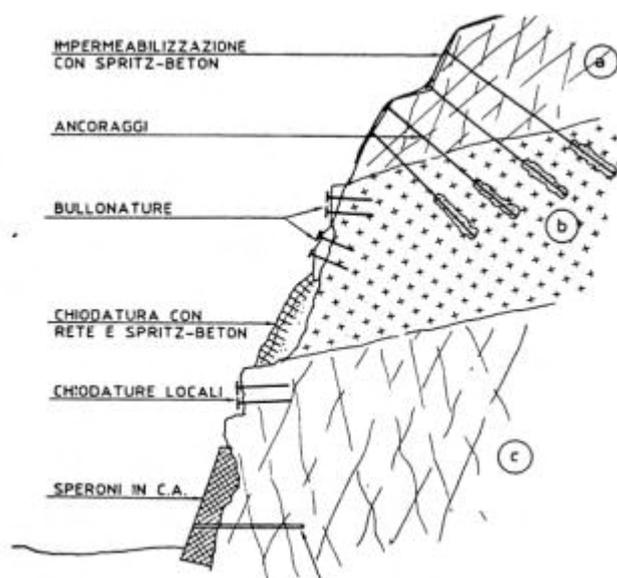
Il RES permette di elaborare uno schema di analisi specifico per il contesto geologico-ambientale e per il problema applicativo che si vuole esaminare. Tale schema costituisce uno strumento di valutazione omogeneo per localizzare, all'interno di una determinata area, le situazioni più gravi. Per queste ultime può essere interessante procedere ad un approfondimento dello studio, integrando il RES con un modello numerico che consenta di ricostruire con maggiore dettaglio le traiettorie dei massi durante il moto lungo il pendio. Tale approccio numerico diviene indispensabile in presenza di frane di crollo con falde di detrito attive, caratterizzate da una notevole pendenza. In questo caso, infatti, la morfologia della falda di detrito può favorire lo svilupparsi di movimenti di rotoscivolamento di cui le metodologie tradizionali, quali il RES, non tengono conto, ma che giocano un ruolo fondamentale nella valutazione del rischio nella zona di accumulo ed espansione del dissesto.

A tal fine, è possibile condurre una simulazione numerica del crollo di blocchi instabili tramite ROTOMAP [7], un modello matematico tridimensionale di tipo "lumped mass". L'approccio che viene utilizzato è di tipo statistico, cioè viene valutato il comportamento medio più probabile, tra tutti quelli fisicamente ammissibili, determinato attraverso la simulazione di un grande numero di eventi. In quest'ottica non vengono forniti i punti di arrivo dei blocchi, ma delle "aree di probabilità" di passaggio ed arresto.

Per utilizzare correttamente i modelli matematici, di cui ROTOMAP rappresenta un esempio particolarmente diffuso, occorre effettuare una preliminare raccolta dati, in modo da poter ricostruire il modello numerico del pendio con la massima precisione possibile. Tale raccolta dati deve condurre ad una dettagliata ricostruzione topografica del versante, nonché alla determinazione della granulometria del materiale costituente la falda di detrito. Quest'ultimo studio è necessario per stimare correttamente i valori delle variabili caratteristiche del sistema attraverso procedure di "back analysis", in particolare per quanto riguarda i coefficienti di restituzione e di attrito al rotoscivolamento della falda di detrito [8].

La simulazione di un gran numero di scendimenti di diversa grandezza e da diversi punti di distacco consente di giungere alla realizzazione di una sorta di carta della pericolosità, che tiene conto del transito e dell'arresto dei blocchi, indipendentemente dal tipo di moto a cui i blocchi sono soggetti.

Per far fronte alle problematiche di crollo descritte, si può ricorrere ad opere di difesa che vengono suddivise di norma in attive e passive (Fig. 4). Gli interventi attivi (disgaggio, chiodatura, bullonatura, ancoraggio, sigillatura, spritz beton e gunite) agiscono eliminando il problema (come nel caso dei disaggi) oppure riducendo i fenomeni di instabilità dei versanti tramite un miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche di resistenza (coesione ed attrito). Gli interventi passivi (reti in aderenza, barriere, valli e gallerie paramassi), invece, hanno la funzione di proteggere la sede stradale dalla caduta di blocchi rocciosi.



**Figura 4 - Illustrazione schematica delle differenti tipologie di rinforzo per pareti rocciose instabili [14]**

E' chiaro che la scelta del tipo di intervento può essere fatta unicamente in seguito ad un'attenta analisi costi-benefici e non può prescindere da un'accurata conoscenza del fenomeno. Per esempio, se l'instabilità della parete coinvolge pochi blocchi di roccia intatta di medie dimensioni (per un volume dell'ordine del  $m^3$ ) gli interventi più efficaci sono sicuramente ancoraggi, bullonature e chiodature; al contrario, se si riscontra la presenza di instabilità di piccole dimensioni (volumetrie di qualche  $dm^3$ ) diffuse su intere pareti rocciose, l'intervento ottimale consiste nella posa in opera di reti in aderenza o nell'uso di spritz beton; infine, per instabilità diffuse di maggiori volumetrie è necessario valutare l'opportunità di ricorrere ad interventi più importanti, quali barriere, valli o gallerie paramassi [9].

In ogni caso la progettazione dell'opera deve essere demandata a tecnici specializzati nel settore, i quali avvalendosi delle informazioni ricavate dalle indagini in sito (fase 1, 2 e 3) e dall'analisi del rischio (fase 4) devono provvedere al loro corretto dimensionamento.

### 3.3 Applicazione al caso delle colate detritiche

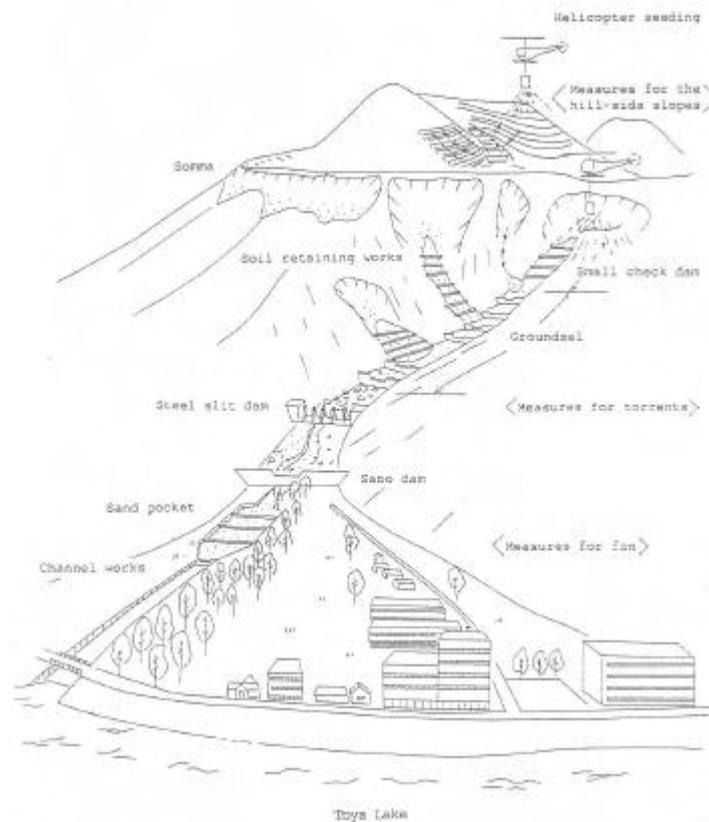
Se lungo l'asse stradale sono presenti (fase 1) impluvi in corrispondenza dei quali possono svilupparsi delle colate detritiche (flussi viscosi di terreno sciolto fluidificato in cui non è possibile identificare delle vere e proprie superfici di scivolamento) è necessario in primo luogo procedere alla caratterizzazione idrologica dell'asta torrentizia (fase 2); tali cinematismi, infatti, si sviluppano in occasione di precipitazioni

intense e prolungate lungo corsi d'acqua aventi elevate pendenze, notevole disponibilità di materiale solido mobilitabile ed assenza di vegetazione. Analogamente a quanto già visto nel caso dei crolli in roccia, è importante procedere ad un censimento delle opere di difesa esistenti (fase 3), con particolare riguardo alle capacità di deflusso dei tali opere.

Per stimare le probabilità d'insuccesso (H) di una colata detritica (fase 4) si può fare riferimento ad alcuni indici di rischio, proposti da Takahashi e dal Ministero dei Lavori Pubblici Giapponese [10], che tengono conto delle caratteristiche morfologiche e geologiche che più incidono nel favorire o scatenare questo tipo di dissesto. Tale procedura consente di attribuire ad ognuno dei bacini presenti nell'area in esame un grado di propensione al dissesto. In particolare, consente di individuare quei bacini più predisposti alle colate detritiche per i quali deve essere effettuata un'analisi di dettaglio, utilizzando ad esempio la formulazione monodimensionale teorico-empirica proposta da Takahashi [10]. Tale modello si basa su un'indagine sperimentale relativa alle modalità di arresto di una colata a seguito di una brusca diminuzione della pendenza del torrente; secondo il criterio di Takahashi, il cono di deposizione prodotto dall'arresto della colata si estende longitudinalmente per una distanza XL, che dipende dalla velocità media della colata, dalle caratteristiche geomeccaniche ed idrauliche del fluido e dalla geometria della valle lungo la quale si sviluppa la colata.

L'interesse per questa tipologia di dissesti deriva dal fatto che l'area di transito e/o di accumulo della colata va spesso ad interagire con infrastrutture e manufatti, generando una situazione ad elevato rischio. Proprio per questo motivo appare indispensabile individuare le aree a rischio, valutare la potenziale interazione del dissesto con il tracciato stradale e, eventualmente, provvedere alle contromisure di mitigazione.

In generale, la prevenzione di dissesti quali le colate detritiche può essere efficacemente condotta tramite degli interventi di protezione idraulica relativi all'intero bacino idrografico potenzialmente interessato dal fenomeno, quali ad esempio la costruzione di briglie, rimboschimenti e terrazzamenti (Fig. 5). Si deve però tenere presente che l'intervento sull'intero bacino va pianificato ed esula, a meno di particolari accordi con le amministrazioni e gli enti pubblici, dalle competenze proprie del progettista della strada. Le procedure che, di norma, vengono utilizzate per la mitigazione del rischio derivante da questa particolare tipologia di dissesto consistono nell'evitare il problema, realizzando localmente dei viadotti la cui luce deve essere dimensionata "ad hoc", in funzione delle volumetrie potenzialmente mobilitabili dal fenomeno, così da garantire la protezione della sede stradale. Per garantire, inoltre, una maggiore protezione agli utenti sarebbe utile provvedere alla messa in funzione di una rete di monitoraggio sulle zone a più elevato rischio, procedendo alla chiusura precauzionale della strada qualora vengano superate le soglie di rischio (in particolare, per quanto riguarda le soglie pluviometriche).



**Figura 5 - Misure di prevenzione attuabili in presenza di corsi d'acqua potenzialmente soggetti a colate detritiche [10].**

#### **4. ESEMPIO DI APPLICAZIONE DELLE LINEE GUIDA ALLA STRADA STATALE LARIANA N. 583**

A titolo di esempio, si riportano di seguito i risultati ottenuti dall'applicazione dell'approccio metodologico descritto in precedenza; tale applicazione riguarda la valutazione del rischio geologico lungo il tracciato stradale della Statale Lariana n° 583, che collega Lecco a Bellagio snodandosi in parte all'interno del territorio provinciale di Lecco ed in parte all'interno della Provincia di Como. Si tratta dunque di un tracciato stradale in esercizio, lungo il quale i numerosi e frequenti fenomeni di dissesto provocano la saltuaria interruzione del traffico. Ciò premesso, si è ritenuto tale tracciato sufficientemente rappresentativo ed interessante per fornire un esempio applicativo delle linee guida proposte. L'obiettivo finale è quello di individuare le zone che richiedono un prioritario intervento e programmare in modo adeguato gli interventi di manutenzione e/o di riqualificazione del tracciato.

##### **4.1 Fase 1: inquadramento dell'area**

L'area in esame si trova nel Triangolo Lariano dove, da un punto di vista geologico, affiorano rocce carbonatiche che risalgono ad un periodo che si estende dal Trias superiore al Cretaceo superiore. Le rocce presenti sono sovente ricoperte dai depositi superficiali di origine glaciale, alluvionale e costiera.

Per quanto riguarda l'assetto geologico-strutturale, l'area è interessata da numerosi fenomeni tettonici a carattere regionale. Un'osservazione generale del territorio

evidenza dislocazioni tettoniche con andamento generale E-O sia di carattere rigido (faglie) che plastico (pieghe), a seconda delle formazioni coinvolte. In dettaglio, nell'area in esame è presente una dislocazione molto importante diretta NNO-SSE, responsabile dell'allineamento di pareti verticali e di tutta la sponda lacustre destra da Bellagio a Onno, proseguendo a monte nell'incisione valliva della Valbrona. Questi lineamenti danno un'evidenza superficiale caratterizzata da corsi d'acqua subparalleli con andamento E-O molto incisi, con scarpate a tratti di notevole sviluppo. Sono presenti inoltre, in corrispondenza del Monte Moregallo, strutture a pieghe e pieghe-faglie e dislocazioni parallele ai sistemi regionali maggiori.

La morfologia del territorio può essere descritta sinteticamente come una serie continua di versanti diretti NNO-SSE e immergenti verso ENE con inclinazione da media ad elevata, bordati al piede dalla linea di sponda del ramo lecchese del Lario, limitati a monte dall'orlo di una serie di terrazzi morfologici e ripiani sommitali che costituiscono le propaggini orientali del Triangolo Lariano.

Lungo la fascia pedemontana rivierasca si aprono tre zone allungate NNO-SSE dove i versanti acclivi tendono ad allontanarsi dalla linea di sponda e le pendenze si riducono facendo spazio ai tre nuclei abitati che compongono il Comune di Oliveto Lario. I pendii sono interessati dall'affioramento quasi continuo di litotipi rocciosi a struttura massiccia a dare un susseguirsi di scarpate e pareti scoscese prominenti verso il lago. I versanti a monte dei nuclei abitati, soprattutto quelli di Vassena e Limonta, sono invece impostati su litotipi rocciosi stratificati e in senso generale meno resistenti rispetto ai precedenti (Foto 1).

#### **4.2 Fase 2: censimento e caratterizzazione dei fenomeni d'instabilità**

La Statale Lariana è caratterizzata, per la morfologia stessa dell'area in esame, da problemi sostanzialmente legati verso monte alla stabilità dei versanti e verso valle all'erosione delle correnti del Lago di Como, in quanto per lunghi tratti il tracciato stradale è proprio a picco sul lago.

L'elevata suscettibilità da frana che caratterizza, in generale, l'area in esame deriva innanzitutto da alcuni fattori intrinseci di carattere geologico-strutturale, quali le proprietà geomeccaniche della matrice roccia e lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi dovuto alla presenza di faglie e di zone di frattura. Inoltre, esistono altri fattori esogeni che contribuiscono a peggiorare le condizioni di stabilità della zona, tra cui si ricordano l'azione della gravità, l'azione erosiva dell'acqua, gli agenti atmosferici e quelli antropici.

Le forme di instabilità che caratterizzano l'area in esame riguardano essenzialmente le pareti rocciose subverticali che costeggiano la maggior parte del tracciato stradale e gli impluvi che corrono trasversalmente al tracciato stradale e possono essere sede di colate detritiche. L'elevata acclività dei versanti ed il notevole grado di tettonizzazione che caratterizza gli ammassi rocciosi affioranti nell'area danno ragione dei frequenti fenomeni di franamento, le cui entità sono estremamente variabili, dal distacco di singoli blocchi di piccole dimensioni al movimento di notevoli volumi di roccia. Per quanto riguarda, invece, le coperture superficiali, sono state rilevate alcune forme di instabilità dei depositi glaciali, ubicati a ridosso della strada, instabilità dovute per lo più alle forti pendenze dei versanti. Questo tipo di fenomeni di instabilità è sicuramente stato accentuato dalla presenza dell'intaglio stradale.



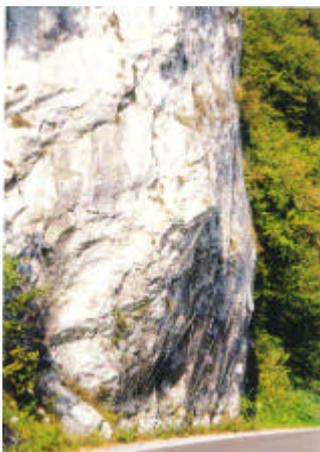
**Foto1 - Esempio di parete aggettante lungo la Strada Statale Lariana n. 583.**

Più in particolare, lungo il tracciato della Strada Statale Lariana n°583 sono stati censiti circa 19 dissesti, di cui 9 riconducibili a crolli in roccia, 7 a colate detritiche lungo i principali impluvi che attraversano la sede stradale, 2 scivolamenti in terra ed uno scivolamento superficiale.

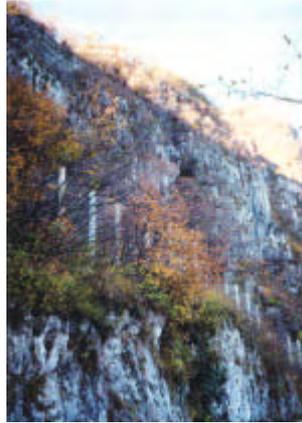
#### **4.3 Fase 3: censimento delle infrastrutture**

Nell'area in esame sono presenti numerose opere di difesa e sostegno a favore dell'infrastruttura viaria. In particolare, si sottolinea la presenza di numerosi muri di sostegno e di controripa, reti e barriere paramassi localizzati in corrispondenza delle pareti rocciose incombenti sulla strada, nonché di numerosi attraversamenti d'impluvio, in corrispondenza delle aste torrentizie che tagliano il tracciato stradale (Foto 2-3-4).

L'elaborazione di una cartografia delle infrastrutture che consenta di localizzare lungo i tracciato stradale le diverse tipologie di opere di difesa e le relative condizioni di efficienza ha condotto ad una migliore conoscenza dello stato di dissesto dell'area, poiché permette di individuare quelle aree in dissesto non sufficientemente protette in cui la vulnerabilità della strada risulta maggiore.



**Foto 2 - Parete rocciosa con reti in aderenza lungo la Strada Statale Lariana n. 583.**



**Foto 3 - Reti paramassi lungo la Strada Statale Lariana n. 583.**



**Foto 4 - Attraversamento di impluvio lungo la Strada Statale Lariana n. 583.**

#### **4.4 Fase 4: valutazione del rischio**

Una volta raccolti tutti i dati necessari, si è passati all'elaborazione di tali informazioni tramite le metodologie specifiche descritte in precedenza, così da giungere ad una cartografia del rischio lungo il tracciato stradale in esame. Di fatto, considerando l'intero tracciato caratterizzato da un medesimo valore degli elementi a rischio, lo studio si è limitato a valutare la pericolosità, tenendo per altro conto della presenza di opere di protezione e del loro stato di efficienza.

Nel caso si volesse effettuare un confronto tra più infrastrutture da un punto di vista del rischio geologico, sarebbe indispensabile introdurre i rispettivi valori di  $W$ , in relazione ai fattori elencati nel paragrafo 3.1 (fase 4).

La valutazione della pericolosità è avvenuta attraverso l'applicazione delle metodologie precedentemente descritte (RES per i crolli in roccia ed indici di rischio specifici per le colate detritiche), dando particolare risalto ai fattori predisponenti e scatenanti dei movimenti franosi, nonché alla presenza di opere di difesa; ciò ha consentito di suddividere il tracciato stradale in tratti omogenei, ciascuno caratterizzato da un medesimo grado di propensione al dissesto.

Come visto in precedenza, in ciascuno di tali tratti sarebbe possibile approfondire lo studio con delle modellazioni numeriche (ROTOMAP per i crolli in roccia e Takahashi per le colate detritiche), in grado di fornire utili informazioni sulla possibile evoluzione

spazio-temporale dell'evento. Di fatto, nel caso in esame, la quasi totalità delle aree soggette a crollo in roccia è caratterizzata dalla presenza di pareti verticali prospicienti la strada ed è quindi evidente che l'area di espansione del dissesto, vale a dire la zona di transito ed arresto dei blocchi, coinvolge inevitabilmente la sede stradale. Tali considerazioni hanno permesso di snellire la procedura, tralasciando la fase di modellazione per questa particolare tipologia di dissesto.

Dunque, individuate le aree di espansione del dissesto, a queste zone sono state assegnate delle classi di pericolosità relativa, sulla base della probabilità di transito e di accumulo del materiale coinvolto dal franamento.

La valutazione finale della pericolosità è stata definita dalle classi precedentemente individuate, aumentandole, mantenendole costanti o diminuendole a seconda della tipologia di opere di difesa eventualmente presenti e del loro stato di efficienza (Fig. 6). Ad esempio, se il tracciato stradale attraversa un impluvio potenzialmente interessato da colate detritiche, è necessario valutare l'adeguatezza della luce del viadotto e la presenza di materiale solido in alveo (detriti, vegetazione, ecc.), che potrebbe inficiare la capacità di deflusso dell'opera.

## **5. CONCLUSIONI**

La realizzazione di una strada, ed in particolare la scelta del tracciato lungo il quale la stessa si sviluppa, impone la risoluzione di importanti quesiti legati principalmente alla geologia locale; essa, infatti, influenza le condizioni di stabilità della sede stradale e delle opere ausiliarie ed incide sui costi dapprima di costruzione e, in un secondo momento, di manutenzione.

D'altro canto, anche la gestione di una infrastruttura viaria richiede la conoscenza dei tratti critici in corrispondenza dei quali si rende necessaria la programmazione degli interventi di manutenzione e di riqualificazione.

Da tali considerazioni e dalla sempre crescente esigenza di garantire un'adeguata prevenzione del dissesto idrogeologico è nata la necessità di definire delle linee guida per la valutazione del rischio geologico; lo studio qui presentato vuole, peraltro, anche rappresentare un contributo concreto all'irrinunciabile esigenza di avviare un processo di armonizzazione delle procedure di analisi dei problemi di interazione tra l'infrastruttura stradale (o ferroviaria) ed il territorio attraversato.

Le linee guida qui definite prevedono l'espletamento di una procedura articolata in fasi (ciascuna propedeutica alla successiva) che richiedono necessariamente competenze complementari da conseguire attraverso l'integrazione delle diverse figure professionali (almeno di geologo e di ingegnere stradale) preposte alla progettazione e gestione di una rete stradale.

Le linee guida definite sono state, a titolo esemplificativo, applicate dagli stessi autori ad una infrastruttura viaria per il caso (la S.S. Lariana n° 583 Lecco-Bellagio) pervenendo alla redazione di una mappa nella quale sono distinte in modo evidente le aree di espansione del dissesto, a ciascuna delle quali sono state assegnate delle classi di pericolosità relativa, sulla base della probabilità di transito e di accumulo del materiale coinvolto dal franamento. L'esperienza condotta nell'ambito del presente studio conferma l'importanza dell'impostazione multidisciplinare sia in fase di approccio metodologico che di soluzione delle problematiche di prevenzione e controllo dei dissesti idrogeologici che possono interessare le infrastrutture di trasporto. In tal senso gli autori di questo studio, che provengono proprio dalle aree disciplinari della geologia

e dell'ingegneria stradale, ritengono che sia quanto mai opportuno proseguire il percorso di dialogo e di proficua collaborazione qui iniziato.



Figura 6 - Carta della pericolosità di un tratto della Strada Statale Lariana n. 583.

## BIBLIOGRAFIA

1. VARNES D. J. (1984): Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. UNESCO Press, Paris
2. PACHAURI A.K. e PANT M. (1992): Landslide hazard mapping based on geological attributes. Engineering Geology, n. 1234.
3. JADE S. e SARKAR S. (1992): Statistical models for slope instability classification. Engineering Geology, n.1235
4. HUDSON J. A. (1992): Rock Engineering System: Theory and Practice. Ellis Horwood Ed.

5. MAZZOCOLA D. (1993) La dinamica dei versanti nella media Valchiavenna (So). Tesi di Dottorato in Geologia Applicata.
6. Pubblicazione BURL n°51/2000.
7. GEO&SOFT INTERNATIONAL (1991): Analisi statistica della caduta massi.
8. GATTINONI P., PAPINI M., BELGERI L., ROCCA A. (1999): Definizione della pericolosità in un'area soggetta a frane di crollo. Quaderni di Geologia Applicata, 6 – 2(1999).
9. AGOSTONI S., LAFFI R., NARDO M., PAPINI M. (1994): “Ottimizzazione della scelta degli interventi di sistemazione di un versante soggetto a frane di crollo”. Costruzioni, n. 463
10. TAKAHASHI (1991): Debris flow. Balkema.
11. BARTON N. (1976): Recent experiences with the Q-system of tunnel support design. Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg, Volume 1, 1976, pp 107-117.
12. BIENIAWSKI Z.T. (1976): Rock mass classification in rock engineering. Proc. Symposium on Exploration for Rock Engineering. Johannesburg, Volume 1, 1976, pp 97-106.
13. CANCELLI A., CROSTA G.B. (1999): Previsione e prevenzione per frane di crollo: descrizione del fenomeno e analisi del rischio. Atti del Convegno: Previsione e prevenzione di movimenti franosi rapidi. Trento.
14. PEILA D. (1999): Tipologia degli interventi di difesa. Atti del Convegno: Previsione e prevenzione di movimenti franosi rapidi. Trento