



C.U.G.R.I.
1.



CONSORZIO INTER - UNIVERSITARIO

per la Previsione e Prevenzione dei Grandi Rischi

Università di Salerno – Università di Napoli “Federico II”

Autorità di Bacino del Sarno

**Attuazione del disposto di cui all'art. 1, comma 1, della Legge 267/98
Così come modificato ed integrato dall'art. 9, comma 2, del D.L.
132/99,
convertito con modifica dalla Legge 226/99**

APPROFONDIMENTI DI CUI ALL'ART. 3 DELLA CONVENZIONE

Rischio di Frana

AREE CAMPIONE

RELAZIONE GENERALE

FEBBRAIO 2000

**IL RESPONSABILE E COORDINATORE
SCIENTIFICO DEL RISCHIO FRANE**

**IL DIRETTORE DEL C.U.G.R.I.
Prof. Ing. L. Cascini**

Introduzione

2. Criteri generali informativi del presente documento

2.1. *Il concetto di Rischio*

2.2. *Obiettivi degli approfondimenti*

2.3. *La strategia individuata per il conseguimento degli obiettivi*

3. Linee guida per la definizione degli interventi strutturali e non strutturali

3.1. *Generalità*

3.2. *Sopralluoghi*

3.3. *Attività immediatamente eseguibili per la riduzione del rischio*

3.4. *Presidio Territoriale*

3.5. *Manutenzione*

3.6. *Indagini*

3.7. *Monitoraggio strumentale*

3.8. *Interventi*

3.8.1. *Crolli in roccia*

3.8.2. *Colate di detrito*

3.8.3. *Scorrimenti in argilla*

3.9 *Criteri per la progettazione degli interventi*

3.10 *Ulteriori considerazioni*

1. Introduzione

L’Autorità di Bacino del Sarno ed il Consorzio inter-Universitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi (C.U.G.R.I.) hanno stipulato una Convenzione finalizzata all’attuazione del disposto di cui all’articolo 1, comma 1, della legge L. 267/98 così come modificato ed integrato dall’articolo 9, comma 2, del D.L. 132/99, convertito con modifica dalla Legge 226/99.

Nell’ambito della Convenzione l’articolo 3 prevede, inoltre, specifiche attività di approfondimento da svolgere in tre siti concordati tra il committente ed il contraente, essenzialmente finalizzati alla definizione, a scala di maggior dettaglio (1:5000), degli scenari di rischio e delle azioni da intraprendere per la mitigazione del rischio.

A tali fini è richiesta la redazione dei seguenti elaborati:

- *Carta geolitologica (ove disponibile);*
- *Carta dei lineamenti strutturali (ove disponibile);*
- *Carta degli elementi geomorfologici significativi (ove disponibile);*
- *Carta inventario dei fenomeni franosi in scala 1:5000;*
- *Stralci della carta degli insediamenti, delle attività antropiche e del patrimonio ambientale di particolare rilievo alla scala 1:5.000;*
- *Carta degli scenari del rischio in scala 1:5000;*
- *Linee guida per la definizione degli interventi strutturali e non strutturali;*
- *Programmi d’interventi per la mitigazione del rischio (strutturali e non strutturali);*
- *Relazione illustrativa finale che evidenzia criteri, metodi, riferimenti, fonti e dati assunti a base delle attività di approfondimento.*

Il presente documento, con la cartografia allegata, fornisce un’adeguata risposta ai non facili quesiti posti in Convenzione in quanto, dopo una illustrazione dei criteri informativi che ne sono alla base, discute nel dettaglio i tematismi prodotti e le ulteriori azioni da intraprendere nelle aree oggetto di approfondimento, al fine di dare ulteriormente seguito al processo virtuoso avviato dall’Autorità di Bacino.

Il fine ultimo di tale processo è rappresentato dalla razionale, ed equa, perimetrazione delle aree a rischio che, in una fase di pianificazione e non di emergenza, passa necessariamente attraverso indagini e studi non previsti, e non prevedibili, in Convenzione oltre che attraverso il confronto, sistematico e proficuo, con tutte le Amministrazioni competenti.

2. Criteri generali informatori del presente documento

2.1. Il concetto di Rischio

I termini *Rischio*, *Pericolosità*, *Vulnerabilità*, ecc., sono da sempre stati utilizzati in uno stesso contesto con significati leggermente diversi, il che ha spesso dato luogo ad equivoci sia nell'interpretazione dei fenomeni, sia nelle azioni che da tali fenomeni sono derivati.

Non a caso nel 1991 le Nazioni Unite, nel dichiarare il periodo 1990-2000 quale *Decennio Internazionale per la Riduzione dei Disastri Naturali*, hanno prodotto un documento (UNDRO, 1991) nel quale hanno ritenuto necessario far chiarezza sull'argomento attribuendo ai vari termini che concorrono alla definizione di *Rischio* ed al rischio medesimo un significato ben preciso, da condividere in ambito politico, sociale, tecnico ed economico.

In particolare, si sono preliminarmente definiti i seguenti cinque termini:

PERICOLOSITA' (P): probabilità di accadimento, all'interno di una certa area e in un certo intervallo di tempo, di un fenomeno naturale di assegnata intensità.

ELEMENTI A RISCHIO (E): persone e/o beni (abitazioni, strutture, infrastrutture, ecc.) e/o attività (economiche, sociali, ecc.) esposte “a rischio” in una certa area.

VULNERABILITA' (V): grado di perdita di un certo elemento o insiemi di elementi esposti “a rischio”, derivante dal verificarsi di un fenomeno naturale di assegnata intensità, espresso in una scala che va da 0 (nessuna perdita) a 1 (perdita totale).

RISCHIO SPECIFICO (RS): grado previsto di perdita a seguito di un particolare fenomeno naturale, funzione sia della “pericolosità” che della “vulnerabilità”.

RISCHIO (R): numero atteso di vittime, persone ferite, danni a proprietà, distruzione o interruzione di attività economiche, in conseguenza di un particolare fenomeno naturale. Ne deriva che esso dipende dal “rischio specifico” e dagli “elementi a rischio”.

rischi naturali dello stesso tipo e della stessa intensità hanno dato luogo, nel corso degli anni, ad un numero sempre maggiore di vittime e ad un impatto sempre più negativo”. I risultati degli studi svolti nell’ambito dell’emergenza idrogeologica del 5 e 6 maggio 1998 hanno, purtroppo, confermato queste conclusioni.

2.2. Obiettivi degli approfondimenti

Pur nella semplicità della definizione fornita dalle Nazioni Unite, dalle brevi considerazioni svolte nel precedente paragrafo emerge che l’individuazione del *rischio di frana* in aree di notevole estensione è una complessa operazione che richiede la contemporanea presenza di più figure professionali (geologi, ingegneri, architetti, agronomi, topografi, ecc.) le quali, ognuno nel rispetto delle proprie competenze, possono contribuire alla:

- individuazione di una frana o dell’ambito nel quale essa può avvenire;
- definizione del suo stato di attività;
- stima della probabilità che essa si attivi o meno;
- valutazione della intensità del fenomeno franoso nella fase parossistica;
- stima delle conseguenze che esso può determinare su persone, strutture, infrastrutture, attività, ecc.

Pur con le approssimazioni derivanti dalla scala adottata (1:25000) e dalla limitatezza dei dati forniti dalle Amministrazioni competenti, un quadro organico di riferimento è stato fornito già nella fase precedente (fase II) sulla base della metodologia esposta nella relazione generale.

In questa terza fase, lo studio è stato riferito ad alcune aree campione, scelte di concerto con l’Autorità di Bacino, per le quali si sono svolti tutti gli approfondimenti (in scala 1:5000) previsti in Convenzione che hanno consentito di sviluppare soltanto alcuni dei tematismi che concorrono alla definizione del *rischio* così come precedentemente introdotto.

La valutazione della *pericolosità* di una frana è, infatti, possibile solo a seguito di valutazioni assai complesse e di rilevante impegno economico, che pongono in relazione l'intensità dell'evento con la sua periodicità. In altre parole, alla *pericolosità* di frana può attribuirsi un valore numerico solo se è nota la relazione che intercorre tra l'*intensità I* del fenomeno franoso (ad esempio, velocità, volume mobilitato, energia) ed il suo *periodo di ritorno T* (intervallo temporale tra due fenomeni di uguali caratteristiche ed intensità).

La definizione di una siffatta relazione nel mentre ha buone probabilità di successo allorquando si dispone di una lunga serie di dati storici (vedi analisi idrologiche o di eventi di piena), è di fatto assai più problematica quando ci si riferisca ad un singolo sito in frana. Pertanto, fermo restando la necessità di acquisire dati puntuali da:

- indagini a carattere geologico, geomorfologico, idrogeologico, etc., particolarmente accurate ed a scala adeguata;
- indagini storiche sui fenomeni franosi e sul contesto fisico nel quale i fenomeni franosi si sono manifestati;
- indagini geotecniche in sito (sondaggi, prove penetrometriche statiche, prove penetrometriche dinamiche, misure del regime delle acque sotterranee, prove di permeabilità in foro, ecc.);
- prove di laboratorio su campioni di terreno indisturbati appositamente prelevati nel corso di perforazioni di sondaggio (caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni),

occorre avere la consapevolezza che dette indagini possono lasciare ancora aree di incertezza come testimoniato dalla letteratura scientifica sull'argomento in questione.

I dati acquisiti dalle indagini possono essere evidentemente utilizzati in maniera diretta in metodi di calcolo sufficientemente consolidati nell'uso corrente (si pensi ai metodi per le verifiche di stabilità di pendii in argilla o a quelli per l'analisi cinematica della traiettoria seguita da un blocco che si distacca da un ammasso roccioso) o costituire una base di conoscenze per l'implementazione di modelli fisico-matematici innovativi.

A titolo di esempio, basti ricordare l'attività di ricerca che si sta svolgendo circa i

meccanismi di innesco e di evoluzione delle colate rapide di fango.

Anche con riferimento alla *vulnerabilità V* degli *elementi a rischio E* sussistono notevoli incertezze, in quanto per la sua valutazione sarebbe necessario disporre di informazioni di notevole dettaglio che, nel caso delle strutture, ad esempio, riguardano le tipologie strutturali, i materiali, le fondazioni, i dettagli costruttivi, ecc.

Una ulteriore, ma fondamentale considerazione da fare, è che lo scenario di franosità, così come definito sulla base del criterio geomorfologico esposto nella relazione fornita al termine della fase II, pur portando in conto tutti gli eventi franosi (rilevabili) occorsi in un passato più o meno recente, è di fatto funzione del sistema fisico-antropico esistente all'epoca degli eventi e, pertanto, presumibilmente molto diverso da quello attuale. Ciò significa che uno scenario di rischio di frana attualizzato dovrebbe essere aggiornato portando in conto:

- uno scenario di suscettibilità geomorfologica a franare che tenga implicitamente conto delle modifiche indotte dal sistema fisico-antropico;
- il sistema fisico-antropico stesso.

Per meglio chiarire questo concetto, solo apparentemente complesso, basti pensare, ad esempio:

- a) a fenomeni avvenuti in passato e che oggi potrebbero essere inibiti per la presenza di opere che, più o meno inconsapevolmente, hanno contribuito ad incrementare i margini di sicurezza nei riguardi di un potenziale collasso;
- b) a fenomeni di neoformazione che potrebbero innescarsi a seguito della costruzione di opere progettate senza tenere in debito conto la stabilità globale del territorio.
- c) ad aree che in passato sono state invase da un fenomeno franoso di una certa intensità, e che potrebbero non esserlo più per effetto di una difesa inconsapevolmente prodotta a monte dalla presenza, ad esempio, di nuove opere di urbanizzazione (edifici, strade, rilevati, ecc.);

d) ad aree che in passato non sono state interessate da alcunché, ma che oggi potrebbero essere invase per un diverso percorso dei volumi di terreno in movimento dovuto alla presenza di opere di urbanizzazione assenti all’epoca dei fenomeni franosi rilevati su base geomorfologica;

I pochi esempi appena elencati mostrano in maniera incontrovertibile che l’acquisizione delle informazioni utili alla definizione univoca della *pericolosità P* (casi a) e b)) e della *vulnerabilità V* (casi c) e d)) necessita di risorse economiche e di tempi sicuramente non compatibili con quelli resi disponibili nell’ambito della Convenzione.

Non a caso l’Autorità di Bacino del Sarno, consapevole di tutto ciò, oltre che della improrogabile necessità di coinvolgimento degli Enti territorialmente competenti, ha limitato le sue richieste alla formulazione degli scenari di rischio, nei fatti basati sulla suscettibilità geomorfologica del territorio e sul sistema fisico-antropico pregresso. Tali scenari sono fortemente propedeutici alla perimetrazione di dettaglio delle aree (ossia alla scala della cartografia catastale) consentendo di giungere, se integrate con le ulteriori azioni di cui si dirà in seguito, ad una valutazione quantitativa del *rischio* e, quindi, ad una classificazione del territorio. Rappresentano, altresì, il presupposto di base per la individuazione delle azioni da intraprendere per la *mitigazione del rischio*, pur in assenza di una sua dettagliata valutazione.

2.3. La strategia individuata per il conseguimento degli obiettivi

Gli obiettivi previsti in convenzione sono stati perseguiti con una metodologia di lavoro essenzialmente basata sui seguenti tre punti:

1. definizione degli scenari di *rischio di frana*;
2. individuazione di un quadro organico ed unitario di azioni che è necessario intraprendere per la *mitigazione del rischio di frana*;
3. selezione di alcune azioni relativamente semplici e di immediata applicazione per il conseguimento di una parziale, ma rapida, *mitigazione del rischio di frana*.

Con riferimento al punto 1, per i siti oggetto di approfondimento sono stati predisposti

tutti quegli elaborati previsti in convenzione che consentono la definizione degli scenari di *rischio di frana* sulla base della suscettibilità geomorfologica e del sistema fisico-antropico pregressi. Ad alcuni elaborati sono state aggiunte altre informazioni (ad esempio, la carta delle coperture e/o la carta degli spessori delle coperture); sono stati altresì redatti altri elaborati quali:

- la carta degli indici di instabilità su base geomeccanica;
- la carta degli scenari delle aree suscettibili a fenomeni franosi;
- la carta delle tipologie di indagine per zone omogenee (allegata, per ogni area campione, alla relativa relazione illustrativa).

Le ulteriori elaborazioni svolte, seppur non richieste dalla Convenzione, sono da ritenersi di notevole valore ai fini della valutazione della *pericolosità* e, quindi, del *rischio* di frana.

Per quanto riguarda il punto 2, sono state individuate tutte quelle azioni attraverso le quali è possibile una riduzione progressiva del *rischio*, seppur in assenza di dati che lo rendano quantificabile.

In particolare, premesso che il controllo del numero e del tipo di *elementi a rischio* (delocalizzazione di insediamenti civili, industriali, agricoli) è, ovviamente, competenza di chi è responsabile della sfera politica e sociale (e, pertanto, esula da ogni specifica competenza tecnica) il contributo della comunità tecnica e scientifica può risultare decisivo nel suggerire e coadiuvare il “gestore del territorio” ad intraprendere numerose altre azioni (punto 3) che possono, nei fatti, contribuire alla *mitigazione del rischio*, quali ad esempio:

- a) le azioni finalizzate al rilievo continuo delle condizioni di rischio utili per attivare un sistema di supporto alle decisioni (sopralluoghi, presidio territoriale, indagini geotecniche, monitoraggio strumentale);
- b) le azioni di manutenzione del territorio e delle opere su di esso esistenti (anche mediante la loro riabilitazione ed adeguamento);
- c) la limitazione d’uso del territorio in condizioni di rischio ritenute critiche in base

alle informazioni raccolte ed elaborate nelle attività di cui al punto a).

Per meglio chiarire questo aspetto, l'esperienza ricavata dall'emergenza idrogeologica del 5 e 6 maggio 1998 ha mostrato in maniera incontrovertibile, con particolare riferimento al dominio carbonatico, che i volumi dislocatisi in quota si sono notevolmente incrementati lungo il percorso, intercettando ed inglobando quei volumi di materiale che era stato, nel corso degli anni, trattenuto a tergo di briglie che si erano completamente interrati. Attività quali quelle descritte alla voce b) avrebbero sicuramente comportato la rimozione di detti volumi e, di conseguenza, ridotto la pericolosità e, quindi, il rischio. In altre parole, una semplice attività di manutenzione può, molto spesso, da sola contribuire significativamente alla *mitigazione del rischio*.

Allo stesso modo, attività di tipo a), comportando necessariamente una maggiore conoscenza del territorio, del suo stato attuale e della evoluzione in atto, nei fatti comporta una riduzione della *pericolosità* e, quindi, ancora una volta del *rischio*.

Attività quali quelle di tipo c), già sperimentate in altre occasioni (si pensi alla limitazione d'uso di un tratto dell'autostrada Napoli-Salerno a seguito della frana della Collina S. Pantaleone) nei fatti determina una riduzione degli *elementi a rischio*, quindi della loro *vulnerabilità*, producendo una *mitigazione del rischio*.

Tale strategia di *mitigazione* del rischio consente, tra l'altro, di utilizzare le notevoli giovani risorse umane ed intellettuali di cui dispone la Regione.

E' evidente che interventi strutturali veri e propri potranno e dovranno essere realizzati solo in quelle zone dove, anche per l'elevato rischio, non sia possibile ricorrere a criteri alternativi. Si vuole però richiamare quanto già affermato nella relazione predisposta al termine della fase II, e cioè che la notevole estensione delle aree esposte a rischio elevato non può in concreto che indirizzare verso una strategia di progressiva *mitigazione* del rischio, che non significa (e non può significare) *annullamento* del rischio. Questo concetto, peraltro esplicito nel dimensionamento delle strade o nella progettazione degli interventi per la protezione dalle alluvioni, ed implicito in quello della protezione sismica ed in qualunque altro progetto di ingegneria, esprime semplicemente l'idea che non è possibile realizzare opere assolutamente sicure.

Pertanto, anche in presenza di interventi strutturali, permane un rischio residuo associato al concetto di probabilità di accadimento di un fenomeno diverso da quello posto a base del progetto.

In conclusione di questo capitolo, si vuole sottolineare che non è stato assolutamente affrontato il problema nell’ottica di redigere progetti, seppur preliminari, di consolidamento (cosa peraltro non richiesta in convenzione, viste anche le risorse messe a disposizione); sono stati, invece, identificati i criteri più utili di indagine e di studio per la definizione di scenari di rischio più dettagliati rispetto a quelli forniti nella fase II della Convenzione, oltre che per la realizzazione degli interventi che concorrono alla mitigazione del rischio, pur in assenza di una sua quantificazione. Successivamente alla messa in opera di tali interventi ed all’ulteriore approfondimento delle conoscenze, secondo il percorso metodologico indicato, sarà possibile ridefinire il rischio attraverso un processo circolare e dinamico di continuo aggiustamento e progressivo miglioramento delle condizioni di sicurezza complessiva del territorio.

3. Linee guida per la definizione degli interventi strutturali e non strutturali

3.1. Generalità

La *mitigazione* del rischio, realmente perseguibile soltanto attraverso la concertazione tra gli Enti territorialmente competenti, richiede azioni tra loro combinate che siano finalizzate all'approfondimento delle conoscenze sui fattori predisponenti e sulle cause innescanti i movimenti franosi, al controllo di tali cause, alla manutenzione del territorio e delle opere già presenti su di esso, alla realizzazione di appropriati interventi di consolidamento, alla verifica della loro efficacia, ecc.

A tale fine, nella relazione sulla *mitigazione* del rischio redatta per dare adempimento al D.L. 180/98, sono state individuate azioni *immediate, a breve, medio e lungo termine*. Tali azioni sono qui di seguito ulteriormente esplicitate con il fine di fornire un quadro organico di riferimento che costituisce il presupposto di base per dare maggiore impulso al processo virtuoso avviato, e che si pone come obiettivo primario un uso del territorio razionale e con i più ampi margini di sicurezza possibili.

Come descritto nella relazione redatta al termine della fase II, le azioni immediate sono quelle che vengono svolte nell'ambito dei primi 6 mesi dalla segnalazione della situazione di rischio, e devono comprendere tutte quelle iniziative atte a verificare e meglio definire lo stato di pericolo e a mettere gli Enti in condizioni di operare rapidamente. Esse vanno eseguite in tutte le zone individuate a rischio, dove devono essere realizzati:

- a) sopralluoghi per la verifica della sussistenza di pericolo imminente per la pubblica e privata incolumità, infrastrutture e patrimonio ambientale e culturale, e per la sua migliore definizione;
- b) la valutazione speditiva dello stato di tutti i manufatti preesistenti nell'area ed il censimento della popolazione residente o comunque vulnerabile;
- c) l'individuazione di tutte quelle attività che è possibile eseguire immediatamente, utili per la riduzione del rischio.

Le azioni a breve termine vanno svolte appena possibile, e comunque nei successivi 6 mesi, e sono finalizzate alla riduzione del rischio ed alla programmazione degli ulteriori interventi. Oltre ad eventuali ulteriori sopralluoghi, esse comprendono:

- a) l'avvio del presidio territoriale, laddove se ne valuti l'opportunità;
- b) l'inizio delle attività di manutenzione straordinaria e delle ulteriori azioni per la riduzione del pericolo incombente
- c) la progettazione dell'eventuale monitoraggio utile per il controllo strumentale delle situazioni critiche;
- d) l'esecuzione di indagini propedeutiche di consolidamento.

Le azioni a medio termine, da eseguirsi nell'anno successivo, hanno la funzione di raccogliere tutti gli elementi necessari per la realizzazione di interventi finalizzati alla messa in sicurezza dell'area. Esse comprendono sia opere di manutenzione, che deve intendersi come un'attività permanente, che le seguenti azioni:

- a) la realizzazione delle indagini per l'approfondimento delle conoscenze delle situazioni in oggetto e la progettazione di quegli interventi di consolidamento che sono ritenuti necessari;
- b) la realizzazione dell'eventuale monitoraggio strumentale che affianchi le indagini conoscitive;
- c) la rimozione delle eventuali ulteriori situazioni di pericolo incombente messe in luce dal presidio territoriale.

Le azioni a lungo termine comprendono tutti gli interventi necessari per la definitiva stabilizzazione delle aree a rischio. Esse comprendono:

- a) gli eventuali interventi definitivi di consolidamento;
- b) la prosecuzione del monitoraggio nelle aree in cui si è ritenuto indispensabile il continuo controllo strumentale anche per la verifica della validità degli interventi eseguiti.

Nel seguito vengono dettagliate tutte quelle azioni che appare necessario mettere in opera nelle aree oggetto della presente relazione.

3.2. Sopralluoghi

I sopralluoghi hanno la finalità di verificare le condizioni di rischio, soprattutto quando non sia stato ancora attivato il presidio territoriale, mediante osservazione diretta, fotografie, filmati ed eventualmente rilievi sporadici di tipo semiquantitativo. Differentemente dal presidio territoriale, che viene svolto con periodicità e sempre dallo stesso gruppo di persone che opera un controllo in continuo del territorio, i sopralluoghi sono azioni sporadiche tese ad accertamenti specifici.

I sopralluoghi possono, comunque, diventare oggetto di una normale attività conoscitiva e di verifica in qualsiasi fase successiva a quella immediata. In particolare, in assenza di presidio territoriale, e dopo che siano stati effettuati interventi di manutenzione o di consolidamento, essi hanno la funzione di verificare l'efficacia di tali interventi.

Nella fase conoscitiva iniziale, i sopralluoghi consentono di stabilire una eventuale priorità tra le zone a rischio, verificando la sussistenza di pericolo imminente per la pubblica e privata incolumità e, all'interno di ciascuna di esse, eventualmente di individuare le porzioni di esse che necessitano degli interventi più urgenti.

I sopralluoghi devono essere svolti da una *équipe* che comprenda almeno un geologo ed un ingegnere esperto in Geotecnica. Essi devono essere documentati da un dettagliato verbale al quale vanno allegate le fotografie ed i risultati di eventuali rilievi e misurazioni da riportare su carta e sotto forma di diagrammi. Una copia dei verbali va conservata dall'Autorità di Bacino competente che provvederà ad elaborare tutti i dati e ad archivarli su supporto informatico. Nel caso di più sopralluoghi, è opportuno ripetere nel tempo le fotografie ed i rilievi, eventualmente installando riferimenti (ad es. picchetti di legno) per misure di modesto impegno.

Pur non avendo la funzione di indagine sistematica sul territorio e sulla sua evoluzione, i sopralluoghi dovranno prevedere, laddove necessario, l'esecuzione di:

- rilievi geologici finalizzati all'accertamento della natura e dei rapporti fra le principali unità presenti nelle aree interessate, e delle loro caratteristiche

- macroscopiche;
- rilievi di tipo geologico-strutturale con particolare riferimento alle caratteristiche dei principali sistemi di discontinuità negli ammassi rocciosi (tipologia, spaziatura, persistenza, orientazione, apertura e grado di riempimento, ecc.);
 - rilievi della tipologia e delle zone di invasione di precedenti fenomeni franosi ancora riconoscibili (nicchie di distacco, zone di accumulo, eventuali blocchi trasportati dai corpi di frana ecc.), ovvero di coltri detritico-alluvionali;
 - rilievi finalizzati alla delimitazione dell’area e della pendenza dei versanti giudicati potenzialmente instabili;
 - rilievi di eventuali zone di concentrazione di deflussi idrici superficiali;
 - controlli delle portate sorgive e dei livelli idrici in pozzi preliminarmente censiti;
 - rilievi di tutti gli elementi indicativi di possibili deformazioni del pendio (apertura di fratture, inclinazione di alberi, lesioni su strutture ecc.) e delle eventuali condizioni di danneggiamento dei manufatti;
 - rilievi delle caratteristiche e dello stato di conservazione di opere idrauliche e di consolidamento già presenti sul territorio.

Nell’ambito dei sopralluoghi è opportuna una descrizione delle caratteristiche litologiche, strutturali e geomorfologiche anche delle aree confinanti a quella in oggetto, con particolare riferimento a quelle che appaiono suscettibili di fenomeni di instabilità. Laddove gli accessi siano difficoltosi per l’impervia morfologia dei luoghi, i rilievi potrebbero essere effettuati con l’ausilio di un elicottero.

3.3. Attività immediatamente eseguibili per la riduzione del rischio

Le azioni immediate hanno la funzione di eliminare il pericolo imminente. La prima funzione delle azioni da mettere in opera per il raggiungimento di questo obiettivo è quella di limitare al massimo l’evacuazione della popolazione e l’interdizione all’uso del territorio senza ricorrere ad impegnative ed onerose progettazioni.

A tale scopo, le attività in questione devono essere dirette a:

- a) eliminare e comunque mitigare le cause, naturali o antropiche, di innesco di frane di primo distacco, di rimobilitazione di corpi di frana quiescenti ovvero di accelerazione di movimenti franosi in atto;
- b) ripristinare l'efficienza di qualsiasi opera civile il cui malfunzionamento rappresenta, di per sé, una causa di frana;
- c) riabilitare le opere di consolidamento già esistenti, la cui funzionalità consentirebbe di mitigare gli effetti degli stessi movimenti franosi.

Tra le cause di innesco, rimobilitazione od accelerazione di movimenti franosi (punto a), si possono citare:

- l'infiltrazione delle acque di pioggia ed il conseguente incremento delle pressioni neutre per riduzione della suzione negli strati superficiali parzialmente saturi, ricarica delle falde idriche o innesco di *cleft pressures* in discontinuità aperte esistenti in ammassi rocciosi, in depositi piroclastici o argillosi;
- fenomeni erosivi diffusi o concentrati, questi ultimi molto rapidi in depositi sabbio-limosi come i terreni piroclastici sciolti presenti nelle zone in esame, per azione delle acque di ruscellamento;
- l'azione delle radici e (localmente, nelle zone d'alta quota) del ghiaccio nelle discontinuità esistenti negli ammassi rocciosi;
- la propagazione di fratture di trazione (negli ammassi rocciosi) o di taglio e/o trazione (nei depositi di terreni sciolti) per cause naturali (ad es. l'alterazione) in funzione delle caratteristiche dei materiali interessati (rigidezza, resistenza e viscosità);
- accumulo di *colluvium*, specie alla base dei versanti e negli impluvi;
- ostruzioni al regolare deflusso delle acque in corrispondenza di impluvi, canali, ecc.;
- sollecitazioni sismiche;
- incendi.

I sopralluoghi, così come il presidio territoriale, consentono di valutare sia i sintomi preparatori del collasso, ma anche (questo nel caso di movimenti molto lenti) i segni

rivelatori dei fenomeni in atto.

Nell'uno e nell'altro caso, se i fenomeni in questione interessano terreni sciolti, tali segni rivelatori possono essere individuati essenzialmente nella formazione di fratture nel terreno (di trazione o di taglio per spinta attiva, nella zona di monte; di compressione, per spinta passiva, in quella di valle; di taglio lungo i bordi), di avvallamenti nella zona di monte e di rigonfiamenti in quella di valle, nella formazione di zone con ristagno d'acqua per difficoltà di drenaggio superficiale in qualsiasi zona dell'area in frana, anomalie nella circolazione idrica sotterranea, nella inclinazione degli alberi e di manufatti, in lesioni nelle strutture e così via.

Nel caso tali fenomeni interessino ammassi rocciosi, i fenomeni preparatori sono essenzialmente individuabili nella apertura delle discontinuità preesistenti, eventualmente nella propagazione di fratture in corrispondenza di “ponti” di roccia integra, in rigonfiamenti del versante per fenomeni deformativi lenti, in anomalie nella circolazione idrica sotterranea, nella inclinazione degli alberi e di manufatti, in lesioni nelle strutture, ecc.

Le azioni immediate da adottare per la *mitigazione* del rischio consistono nella regolazione del deflusso delle acque, nella eventuale pulizia e rimozione di ghiaccio in corrispondenza di discontinuità in roccia nei siti di alta quota, nella rimozione di materiale accumulato in zone instabili o in impluvi e canali sede di naturale deflusso delle acque, nella sigillatura di fratture aperte nel terreno o nella rimodellazione di aree morfologicamente depresse che possono essere sede di infiltrazione concentrata di acqua.

Laddove si constati l'impossibilità di interventi efficaci (ad es. in zone dove l'evoluzione dello stato di fratturazione non è controllabile con mezzi ordinari ed in tempi brevi), sono necessarie azioni di tipo diverso, come, ad esempio, quelle tipiche di protezione civile.

Con riferimento alle opere di tipo idraulico (acquedotti, fognature, canalette drenanti, briglie, ecc.), si osserva che il loro malfunzionamento può essere causa di fenomeni di instabilità dovuti alla infiltrazione delle acque negli strati superficiali, a fenomeni di erosione concentrata, e più in generale al mancato controllo delle acque superficiali (punto b precedente).

Tra le azioni immediate si deve quindi includere il controllo di tutti i manufatti esistenti sul territorio e la loro rimessa in funzione od in esercizio, qualora se ne constati l'inefficacia o addirittura l'assenza di funzionamento.

Il piano delle azioni immediate deve, infine, includere la riabilitazione di opere di consolidamento già esistenti sul territorio (punto c) e caratterizzate da naturale degrado dei materiali che le costituiscono, da stato di fessurazione, da rotture parziali o totali.

Tra queste, le opere di tipo idraulico (drenaggi di vario tipo, superficiali e profondi, intervento di controllo delle acque superficiali) sono particolarmente soggette a perdita di efficienza ed hanno, allo stesso tempo, una notevole influenza sulle condizioni di stabilità dei versanti, sia per la conseguente perdita dei relativi effetti positivi sul regime delle pressioni neutre, sia perché potrebbero, addirittura, produrre effetti negativi sullo stesso regime delle pressioni neutre (ad es. a causa di immissioni di acque in zone instabili, dovute alla perdita di continuità idraulica di tali manufatti).

Altre opere il cui malfunzionamento può essere particolarmente influente sulla stabilità dei versanti sono individuabili nelle strutture metalliche, come i tiranti (soggetti a corrosione ed a cadute di tensione nel tempo), qualsiasi altro tipo di ancoraggio ed i chiodi (soggetti a corrosione), barriere e reti paramassi, per la rottura o la corrosione di elementi che fanno parte del sistema (funi, maglie metalliche) o per lo scalzamento delle fondazioni. Anche le strutture di calcestruzzo e simili (muri di sostegno, placcaggi, paratie, gunitature ecc.), soggette alla naturale degradazione del materiale ed a fenomeni di fessurazione, subiscono una perdita di efficienza nel tempo e vanno pertanto controllate.

Si rileva, infine, che il ricorso ad interventi di tipo vegetazionale, se affidati ad esperti del settore, può contribuire alla stabilità dei versanti mediante la sua funzione regolatrice degli scambi di umidità con l'esterno, il controllo dell'erosione superficiale e la funzione resistente delle radici, per lo meno nel caso di un apparato radicale consistente e di fenomeni di instabilità superficiale (tipici nel caso delle coltri piroclastiche presenti nell'area in questione).

3.4. Presidio Territoriale

Il presidio territoriale è finalizzato al rilievo in continuo delle modifiche di carattere

geomorfologico che intervengono nelle zone a rischio elevato, e degli eventuali processi deformativi e di rottura sulle strutture e sulle infrastrutture presenti in tali zone, in un’ottica di gestione oculata del rischio. Normalmente, nell’ambito dell’attività di presidio va inoltre controllata sia l’efficienza di opere, presenti sul versante, il cui malfunzionamento potrebbe influire sulle condizioni di stabilità dei terreni, sia la funzionalità di opere di consolidamento già presenti nell’area in questione (v. paragrafo precedente).

Il presidio territoriale si distingue dalla normale attività svolta mediante i sopralluoghi, sia perché, a differenza di questi ultimi, è continuo nel tempo ed ha frequenza all’incirca costante, sia per i contenuti di tale attività, caratterizzata da rilievi sistematici di elementi geomorfologici ed idrogeologici, e di tutte quelle grandezze (spostamenti, pressioni neutre, sforzi) che rappresentano la spia degli eventuali fenomeni deformativi (monitoraggio). Pertanto, nell’ambito del presidio vanno raccolti tutti quegli elementi di base di tipo geologico, morfologico ed idrogeologico che concorrono alla conoscenza del territorio e della sua evoluzione nel tempo, oltre che i dati strumentali misurati dai sensori non automatici, installati per il controllo delle condizioni di stabilità dei versanti, che consentono di integrare i rilievi qualitativi e semiquantitativi oggetto dei sopralluoghi. L’attività di monitoraggio può essere esclusa solo nel caso in cui il programma di misure strumentali abbia esplicitamente previsto l’adozione di strumenti in grado di trasmettere a distanza i dati oggetto delle misure, ovvero quando il controllo strumentale sia stato affidato ad una ditta specializzata incaricata di sviluppare tale attività.

In sintesi, l’attività di presidio può includere la redazione dei seguenti documenti di lavoro:

- un carta geologica e strutturale
- rilievi di dettaglio dei sistemi di discontinuità presenti negli ammassi rocciosi;
- una carta delle coperture di tipo detritico e piroclastico;
- una carta geomorfologica di dettaglio;
- una carta inventario dei punti d’acqua (pozzi, sorgenti);
- una carta dei movimenti franosi avvenuti;

- schede con tutte le informazioni già disponibili, o da raccogliere, sulle cause, la geometria, i meccanismi, la cinematica e gli interventi realizzati su tali movimenti franosi;
- una carta degli insediamenti;
- una scheda del tipo di strutture ed infrastrutture (con particolare riferimento a quelle idrauliche) presenti nell’area in frana e delle relative condizioni statiche;
- una scheda delle condizioni di esercizio delle strutture di consolidamento eventualmente presenti sui versanti;
- una carta degli elementi rivelatori di fenomeni franosi incipienti o in atto; una volta identificati, questi saranno individuati con una sigla, fotografati e segnalati a terra (quando possibile) mediante un picchetto od un cartello con l’indicazione della sigla corrispondente;
- diagrammi temporali dei principali parametri indicativi dei fenomeni franosi incipienti o in atto (apertura di fratture negli ammassi rocciosi o nei depositi sciolti di copertura, spostamenti assoluti o differenziali dei pendii, pressioni neutre o suzioni nel sottosuolo, inclinazione di manufatti, distanze tra oggetti mobili ed oggetti immobili, ecc.).

I rilievi effettuati nel corso del presidio territoriale permettono di variare eventualmente il programma di monitoraggio o quello degli interventi programmati per la manutenzione e/o il consolidamento dell’area in questione. In particolare, il presidio territoriale consente di gestire nel modo migliore quegli interventi di manutenzione che, da soli, in molti casi possono assicurare la stabilità di aree soggette a potenziali fenomeni di frana.

Nell’ipotesi che, per la specifica zona sotto controllo, siano state individuate una soglia di allerta ed una soglia di allarme collegate a misure non automatizzate, compito fondamentale del presidio è anche quello di verificare l’evoluzione della situazione in rapporto ai valori indicati dalle soglie.

Il presidio deve essere svolto da personale tecnico qualificato che includa per lo meno un geologo ed un ingegnere. I prodotti dell’attività di presidio, così come i verbali delle attività di sopralluogo, devono essere consegnati alla competente Autorità di Bacino ed

archiviati su supporto informatico.

L'attività del presidio territoriale va sottoposta ad un responsabile che ne trae le indicazioni necessarie per la gestione del rischio e l'eventuale attivazione, quando esistenti, delle soglie di allerta o di allarme.

3.5. Manutenzione

La manutenzione rappresenta l'insieme di tutti quegli interventi ordinari *sia sul territorio che sulle eventuali opere su di esso già esistenti*, che hanno la funzione di ridurre la probabilità di frana e, comunque, di mitigarne gli effetti prescindendo dal ricorso a specifiche opere di consolidamento, economicamente molto più impegnative.

Al fine di ridurre la frequenza e l'intensità dei fenomeni di frana, la manutenzione va eseguita periodicamente in modo da impedire l'accumulo di quei fenomeni di degrado che alla lunga portano alla instabilità.

La manutenzione del territorio, se effettuata in aree interessate da movimenti franosi di piccole dimensioni, può consentire la completa eliminazione del pericolo di frana e così, di fatto, può sostituirsi alla realizzazione di opere di consolidamento o comunque, integrata con esse, può ridurre gli oneri.

La manutenzione delle opere ha la funzione di limitarne la naturale degradazione e perdita di efficienza. Essa si realizza in genere attraverso una serie di piccoli e poco costosi interventi.

In linea di principio, lo strumento principale di indagine alla base delle scelte relative alla definizione degli interventi di manutenzione sono i sopralluoghi e/o l'attività di presidio territoriale. Naturalmente, sia la natura dei terreni interessati, che i meccanismi dei potenziali fenomeni di instabilità influenzano considerevolmente tali scelte.

Normalmente, gli interventi di manutenzione sono analoghi a quelli precedentemente indicati come interventi immediati per la riduzione del rischio, con la differenza che quelli potrebbero essere considerati come attività di manutenzione straordinaria, mentre l'attività qui definita deve essere considerata ordinaria dovendosi svolgersi con periodicità e sistematicità.

In linea di principio, qualsiasi intervento di manutenzione del territorio finalizzato alla regolazione del deflusso delle acque superficiali, specie in zone a drenaggio difficile,

vuoi per attività antropiche, vuoi per effetto di precedenti fenomeni franosi, è opportuno, qualsiasi sia la tipologia dei terreni, e dei possibili meccanismi di frana. E' infatti ben noto, che l'azione delle acque è sempre causa di frana, in ogni tipo di terreno. Per questo motivo, qualsiasi ostruzione nel libero deflusso delle acque superficiali, così come qualsiasi concavità morfologica o frattura nel terreno che favorisca ristagni d'acqua ovvero infiltrazioni concentrate, vanno eliminate, rispettivamente mediante rimozione dei materiali che sono la causa di ostruzioni, rimodellamento del terreno con piccoli macchinari, sigillatura delle fratture.

Un'altra frequente causa di frana in terreni sciolti è l'erosione. Questa, alla lunga, determina modifiche degli stati tensionali e degradazione meccanica dei terreni, specie quelli a grana fina. Nei terreni limo-sabbiosi (come quelli piroclastici) l'erosione concentrata produce rapidi fenomeni di instabilità superficiale con effetti a catena e possibili meccanismi di collasso strutturale, specie in terreni di elevata porosità.

In questi casi, la manutenzione deve essere finalizzata ad impedire che si creino le condizioni per lo sviluppo di fenomeni di erosione. Tale risultato può essere ottenuto tramite la regolazione delle acque superficiali, evitando in particolare deflussi intensi e concentrati, e la protezione degli affioramenti con gabbionate, muretti, ovvero mediante piantumazioni eventualmente integrate con sistemi tipo geostuoie ovvero il rinforzo dei terreni con materiali plastici largamente diffusi in commercio.

In ammassi rocciosi, la pulizia di apparati radicali capaci di produrre l'apertura delle discontinuità e la eventuale rimozione di ghiaccio in corrispondenza di discontinuità aperte possono avere una certa influenza positiva sulla stabilità dei versanti.

In un'ottica di lungimirante protezione del territorio, la manutenzione può includere limitati interventi di stabilizzazione, eventualmente ripetuti ed integrati nel tempo, capaci di produrre un progressivo incremento dei coefficienti di sicurezza. Ad esempio, anche modesti movimenti di terra destinati alla rimozione di materiale instabile, o al consolidamento, mediante la costruzione di berme, del piede di scoscendimenti, ovvero la realizzazione di muretti, opere di tipo idraulico-forestale (vimate, piccole briglie) ecc. possono produrre effetti benefici, fino alla stabilizzazione del pendio, quando i fenomeni di instabilità sono di modeste dimensioni. Anche quando i potenziali fenomeni di instabilità acquistino dimensioni maggiori, la somma di detti interventi

potrà, alla lunga, produrre effetti benefici.

A questo tipo di interventi si possono aggiungere quelli di tipo vegetazionale e quelli finalizzati alla protezione degli stessi versanti dagli incendi.

Come già precisato, l'attività di manutenzione deve includere anche continui interventi su manufatti, sia di tipo strutturale o infrastrutturale, che di consolidamento. La manutenzione dei manufatti riguarderà ogni manufatto in grado di incidere negativamente sulla stabilità del territorio. Fra queste, ogni infrastruttura (strade, muri ecc.) dotata di inadatte o inefficienti opere idrauliche di convogliamento e scarico delle acque superficiali, ovvero manufatti utilizzati per il trasporto di acqua (tubazioni, canali a sezione chiusa), le cui perdite idriche potrebbero aggravare le condizioni di stabilità dei versanti. A tal fine, è importante: la pulizia continua di cunette, canali di gronda, la cui ostruzione comporta lo sversamento di portate d'acqua all'esterno, con possibilità di infiltrazioni in profondità nonché il controllo continuo, e le eventuali riparazioni, di manufatti idraulici destinati al trasporto di acque pulite o reflue.

E' infine necessario il continuo ripristino e la ripresa di efficienza di opere di consolidamento presenti sul territorio: opere idrauliche, interventi di tipo idraulico-forestale, manufatti strutturali in acciaio o in calcestruzzo. Su tali manufatti andranno pertanto effettuati continui controlli e misure: ad esempio, nel caso dei drenaggi, controlli sulle portate emunte dal sottosuolo (anche in relazione al regime delle piogge) ovvero, nel caso di ancoraggi attivi, controlli sui valori degli sforzi di tesatura.

E' appena il caso di rilevare che qualsiasi intervento di manutenzione dovrà essere oggetto di un apposito progetto, che può essere eventualmente basato anche solo sui risultati dei sopralluoghi e dell'attività del presidio territoriale.

3.6. Indagini

Le indagini hanno la funzione di raccogliere tutti i dati ritenuti necessari per la progettazione degli interventi finalizzati alla mitigazione del rischio. In linea di principio, tali dati sono di tipo topografico, geologico, geomorfologico, idrogeologico, urbanistico, geotecnico, idraulico, forestale e strutturale.

Il programma delle indagini deve essere definito in uno o più progetti redatti da tecnici competenti. In questa sede vengono descritte solo le indagini, o quegli aspetti di esse,

che hanno stretta attinenza con i problemi di instabilità dei pendii.

3.6.1. Rilievi topografici

I rilievi di tipo topografico, da affidare a tecnici competenti della disciplina, consentono una esatta rappresentazione del territorio e sono uno strumento di lavoro essenziale per le indagini di carattere geologico, idrogeologico, geomorfologico, geotecnico, idraulico, etc..

La rappresentazione topografica del territorio deve essere eseguita sulla base di foto aeree, rilievi a terra ed eventualmente fotogrammetria terrestre.

La cartografia ricavata da tali rilievi va sviluppata in una scala adeguata alla dimensione delle aree investigate. In particolare, nel caso di aree riconosciute in frana, è utile che la specifica base cartografica di dettaglio non sia strettamente limitata a queste, ma sia estesa a superfici con dimensioni maggiori di quelle della frana. In effetti, non si può escludere che movimenti anche modesti interessino superfici più ampie di quelle considerate in movimento, o che i movimenti si estendano successivamente alle aree confinanti.

La scala della rappresentazione deve essere commisurata alla dimensione delle aree in frana. Solo indicativamente, per lo studio di dettaglio di frane di larghezza minore di 200 m, la scala deve essere almeno 1:500, per frane di larghezza maggiore di 200 m, la scala può essere minore.

3.6.2. Indagini geologiche

I rilievi geologici, geomorfologici e idrogeologici vanno affidati a geologi esperti che li svolgeranno nell'ambito di campagne appositamente programmate. Come si è già precisato, i rilievi geologici fanno parte anche della comune attività del presidio territoriale.

Il prodotto di tali indagini deve essere costituito da una serie di carte tematiche, tra cui almeno:

- un carta geolitologica e strutturale;
- una carta delle coperture;

- una carta geomorfologica di dettaglio;
- una carta della rappresentazione dei corpi di frana;
- una carta idrogeologica;
- una carta del reticolo idrografico nel caso di analisi geomorfiche quantitative di bacini in forte erosione.

La scala delle carte tematiche deve essere almeno corrispondente a quella della cartografia disponibile.

I criteri di allestimento sono quelli consolidati nella pratica professionale e presso la Comunità scientifica (vedi in particolare SGN e GNGFG).

Essi si basano sulle tecniche di rilevamento in sito coadiuvato dall'analisi di foto aeree di varia età (specie per gli aspetti strutturali e geomorfologici) e dalle risultanze di indagini geologiche *ad hoc* (perforazioni, prospezioni geofisiche) necessarie per tarare gli schemi stratigrafico-strutturali (in generale) ed i modelli geometrici preliminari dei corpi di frana.

A seconda dei contesti geologici nei quali si opera, verranno evidenziati gli aspetti più significativi ai fini dei problemi di instabilità: rapporti tra depositi di copertura e substrati relativi, spessori di depositi di copertura e/o coltri di alterazione, assetto geostrutturale delle rocce lapidee fratturate analizzato in stazioni di misura secondo le raccomandazioni I.S.R.M. (1978), “forme” della superficie topografica riconducibili a fenomeni deformativi in atto, anomalie nella geometria del reticolo idrografico, dislocazione di manifestazioni sorgentizie e di zone di ristagno, analisi geomorfica quantitativa (secondo esperienze ben note in ambito scientifico) nel caso di settori di versante in terreni fortemente erodibili e perciò tali da favorire diffusi ed intensi fenomeni erosivi di sponda e di fondo (con conseguenti forti trasporti solidi a valle).

Nel caso della carta-inventario delle frane si adotterà il criterio di classifica proposto da Varnes (1978) e rivisto da Cruden & Varnes (1996).

Per quanto attiene alle indagini geognostiche previste dal geologo e alle perforazioni in particolare, esse verranno ubicate all'interno ed all'esterno dell'area interessata dal movimento di versante e dovranno consentire una puntuale descrizione della stratigrafia del sottosuolo (in termini di identificazione delle varie unità litologiche e delle loro

caratteristiche strutturali). Il ricorso a scavi potrà risolvere molti complessi aspetti connessi all'interpretazione dei meccanismi deposizionali di molti terreni. Gli elaborati cartografici ed i risultati delle indagini formeranno oggetto di relazioni illustrative corredate da sezioni geologico-geomorfologiche.

3.6.3. Indagini geotecniche

Le indagini geotecniche devono essere eseguite da ditte dotate di adatti requisiti e programmate da un ingegnere esperto in geotecnica che svolga anche la relativa direzione dei lavori. L'esecuzione di tali indagini deve essere effettuata nel rispetto delle Raccomandazioni edite dall'Associazione Geotecnica Italiana (Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini in sito, 1977; Raccomandazioni sull'esecuzione delle prove geotecniche di laboratorio, 1994).

Le indagini geotecniche hanno lo scopo di definire un modello di sottosuolo da utilizzare per lo svolgimento delle analisi necessarie per la valutazione delle condizioni di stabilità dei versanti, la simulazione del comportamento indotto da azioni esterne e la progettazione dei necessari interventi di consolidamento.

Il modello di sottosuolo dovrà includere una schematizzazione della struttura dei terreni e del regime delle acque sotterranee e delle pressioni neutre, una caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e dei sistemi di discontinuità eventualmente presenti, ed infine, se ritenuto necessario, una stima dello stato tensionale iniziale.

La definizione della struttura del sottosuolo deve essere effettuata in base ad una campagna di sondaggi, ed eventualmente pozzi, trincee, o addirittura gallerie esplorative, ad integrazione delle osservazioni di carattere geologico in modo da inquadrare i dati geotecnici in un modello geologicamente compatibile. Specie in presenza di orizzonti fortemente eterogenei (coltri ammorbidite o eluvio-colluviali su depositi argillosi consistenti, coltri eluvio-colluviali e depositi piroclastici su formazioni lapidee, corpi di frana ecc.) ci si avvarrà dei risultati di indagini geofisiche, ai fini della ricostruzione dell'andamento dei contatti. Tali indagini vanno comunque sempre calibrate con i risultati di classiche campagne di sondaggi.

In molti casi può essere opportuno sviluppare la campagna di indagini geotecniche in più fasi. In particolare, quando possibile, è opportuno individuare le seguenti fasi:

1. Una fase *preliminare* da eseguirsi possibilmente solo dopo le indagini geologiche e geomorfologiche (o di una parte sufficientemente estesa di queste). In tal modo, lo studio geotecnico potrà prendere le mosse da una base di conoscenze da utilizzare come valida guida per il progetto delle stesse indagini geotecniche. Nei limiti del possibile, sarà opportuno che tale campagna abbia luogo nel periodo meteorologicamente più sfavorevole nei riguardi della stabilità, in modo che i dati raccolti riflettano implicitamente tali sfavorevoli condizioni (ad esempio, nei valori delle quote piezometriche o della coesione non drenata degli strati più superficiali).
2. Un fase *di approfondimento* che spesso si rende necessaria quando lo studio complessivo comincia a fornire un quadro d'assieme coerente e consente di individuare quegli elementi di dettaglio, non ancora investigati, la cui conoscenza è necessaria per ottenere la soluzione completa del problema.
3. Una fase *di completamento* generalmente costituita dal solo monitoraggio strumentale che, a sua volta, spesso integra i dati raccolti nelle fasi precedenti (ad esempio, nel corso del presidio territoriale). Poiché, come è noto, i pendii sono soggetti a variazioni cicliche degli stati tensionali spesso legate alle oscillazioni del regime delle pressioni neutre, quando possibile è opportuno che il monitoraggio sia esteso ad almeno un anno intero o anche, tenuto conto dei cicli climatici, a più anni consecutivi.

Sondaggi

Quando possibile, è opportuno ubicare i sondaggi lungo allineamenti disposti secondo le linee di massima pendenza, una delle quali in asse all'eventuale movimento franoso in istudio. Quando l'oggetto dei rilievi è un'area in frana, non si deve trascurare, come già detto in precedenza, di ubicare alcuni sondaggi al di fuori della zona in movimento; essi vanno inoltre approfonditi al di sotto della superficie di scorrimento. Nei terreni sciolti di copertura che possono essere stati sede di antiche frane, la lunghezza dei sondaggi o dei pozzi esplorativi deve essere spinta fino ad una profondità pari ad almeno 1.5 volte lo spessore del presunto corpo di frana, specie quando i terreni si presentino omogenei con la profondità.

Con l'eccezione delle perforazioni finalizzate alla installazione di strumenti nel terreno,

i sondaggi vanno eseguiti a carotaggio continuo, limitando al minimo l'uso di acqua di perforazione. L'esame accurato delle carote può infatti consentire, come già anticipato, di ricostruire con accuratezza il dettaglio geologico-strutturale del sottosuolo, con particolare riguardo alla presenza di paleosuoli, di superfici di taglio e di zone ammorbidite (che possono essere indicative della presenza di un antico corpo di frana). Per l'esecuzione dei sondaggi ed il prelievo dei campioni indisturbati di terreno vanno adottati adatti strumenti. Come è noto, questi dipendono notevolmente dalla natura dei terreni attraversati.

Prelievo di campioni

Per il prelievo di campioni indisturbati (classe di qualità Q5), nelle coltri di copertura di terreni argillosi ed in assenza di elementi lapidei, potrà essere sufficiente l'utilizzazione di campionatori a pressione tipo Shelby. In profondità, per la consistenza dei terreni non è detto che questo tipo di campionatore sia sufficiente. Sarà pertanto opportuno il ricorso a campionatori a rotazione a doppio o triplo carotiere. L'uso di campionatori a pistone, tipicamente utilizzati per terreni a grana fina di bassa consistenza, è improbabile: potrebbe infatti essere utile solo in zone di modesto spessore costituite da terreni estremamente ammorbiditi.

In terreni sabbio-limosi (ad es. in terreni piroclastici) il prelievo di campioni di buona qualità è difficile e delicato. In ogni caso, esso andrà realizzato con campionatori a pressione. Il prelievo mediante martinetti, da pozzi o trincee, è spesso opportuno; in questo caso è estremamente efficiente l'utilizzazione, come campionatori, delle fustelle del laboratorio.

Il campionamento in materiali di frana non è sempre facile per la variabile consistenza dei terreni anche lungo tratti brevi, e per la presenza di elementi lapidei. Per questo motivo, il diametro del campionatore deve essere sufficientemente grande (possibilmente maggiore di 85 mm). Inoltre, quando possibile, è sempre meglio effettuare prelievi in pozzi o trincee direttamente con le fustelle del laboratorio.

Nello studio delle carote è necessaria la definizione esatta della percentuale di carotaggio, del coefficiente RQD e della natura delle discontinuità (negli ammassi e negli strati rocciosi), della resistenza all'avanzamento del penetrometro tascabile (negli

strati limo argillosi). Anche questa indicazione, oltre ad essere utile per inquadrare il comportamento del terreno, può essere indicativa di anomalie dovute a movimenti pregressi. E' appena il caso di ricordare che la determinazione del coefficiente RQD ha significato solo nel caso il carotaggio viene eseguito con tecniche opportune (ad es. mediante uso di doppio carotiere).

Stratigrafie dei sondaggi

Le schede descrittive delle stratigrafie devono essere sempre estremamente dettagliate, con indicazione:

- delle unità litostratigrafiche di appartenenza dei singoli “orizzonti”;
- della percentuale di carotaggio;
- del coefficiente RQD;
- del tipo e della spaziatura di fessure e discontinuità;
- della granulometria e della plasticità dei terreni attraversati;
- della loro consistenza (anche con l’ausilio delle misure di consistenza effettuate con penetrometro tascabile);
- della presenza di frammenti, lamine, sacche di terreni di riempimento;
- della eventuale presenza di sostanza organica, che va riconosciuta mediante utilizzazione di acqua ossigenata, di inclusioni carbonatiche che va riconosciuta mediante utilizzazione di acido cloridrico, e di zone ossidate;
- del colore;
- delle quote di rinvenimento di eventuali vene di acqua in pressione.

Una descrizione molto accurata delle carote estratte dai sondaggi è ancor più fondamentale nel caso di studi di corpi di frana in terreni argillosi dei quali occorra identificare la superficie di scorrimento, In questi casi, infatti, è importante evidenziare la presenza di fasce di ossidazione, di discontinuità interpretabili come zone di taglio, di sostanze organiche etc. In questi stessi contesti (in particolare in terreni argillosi omogenei mediamente consistenti), si può fare ricorso a prove penetrometriche di tipo

statico (CPT) ovvero a prove di tipo pressiométrico.

La rappresentazione grafica dei sondaggi e delle (eventuali) prove penetrométriche statiche consentirà di definire con chiarezza la struttura del deposito secondo direzioni significative ai fini dei calcoli geotecnici di stabilità.

I primi risultati delle indagini possono guidare verso una successiva modifica ed affinamento in corso d'opera dello stesso programma di indagini (ubicazione dei sondaggi, loro profondità ecc.). Per questo motivo, la scelta dei sondaggi da eseguire per primi potrà risultare essenziale per l'esecuzione di una razionale campagna di indagini.

Piezometri

Il regime delle acque sotterranee va investigato mediante piezometri. Poiché nei pendii in generale l'acqua è in movimento, e pertanto le quote piezometriche variano punto per punto e, in particolare, con la profondità, è d'obbligo l'esecuzione di misure puntuali mediante piezometri idraulici dotati di apposita cella, ovvero piezometri a tubo aperto sfinestrati solo per un breve tratto. Questo, come è noto, va isolato sopra e sotto mediante tamponi impermeabili e circondato da un filtro permeabile.

Il numero di piezometri deve essere tale da consentire di ricostruire il regime di flusso sulla base di dati puntuali. E' buona norma disporre più piezometri lungo la stessa verticale.

La scelta del tipo di piezometri è funzione della natura dei terreni interessati, ed in particolare del loro tempo di risposta, oltre che dei valori attesi delle altezze piezometriche: ad esempio, al di sopra della superficie a pressione atmosferica e, in particolare, in terreni parzialmente saturi, è necessario installare piezometri o tensiometri capaci di misurare altezze piezometriche negative.

Nei pendii naturali spesso non è necessario un tempo di risposta assai rapido e quindi, al di sotto della superficie a pressione atmosferica, piezometri del tipo Casagrande possono essere sufficienti. L'uso dei piezometri a tubo aperto è invece sconsigliato e addirittura inutile, se sfinestrati a tutta altezza.

L'accoppiamento con pluviometri può essere utile anche per ricostruire la relazione esistente tra precipitazioni e pressioni neutre ovvero adottare sistemi di allerta basati su

relazioni empiriche (o statistiche) tra piovosità e franosità.

Anche negli ammassi rocciosi può essere utile installare piezometri ai fini del controllo dello schema di circolazione idrica e dei rapporti di questa con le sovrastanti coperture. Quando non si ritiene significativo questo tipo di indagini ovvero non è possibile l'installazione di piezometri, è indispensabile almeno un attento rilievo delle manifestazioni sorgentizie e delle risorgenze di acqua.

Caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce

La caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e dei sistemi di discontinuità in roccia deve essere effettuata mediante opportune indagini in sito od in laboratorio su campioni di classe di qualità adeguata al tipo di determinazione richiesta. A tal fine la scelta del campionatore e delle modalità di campionamento sono di notevole importanza.

La tipologia delle prove in sito ed in laboratorio va scelta in funzione della natura dei terreni interessati.

Negli ammassi rocciosi, la determinazione della permeabilità può essere eseguita in foro, adottando, ad esempio, la tecnica Lugeon.

In questi contesti è, a volte, opportuno eseguire prove di taglio diretto in sito in pozzi o cunicoli. La loro esecuzione è peraltro molto impegnativa e costosa. Pertanto potrebbero essere eseguite semplici prove di *tilt* o di *pull* per la determinazione del coefficiente di rugosità da introdurre nella relazione empirica proposta da Barton e Choubey ai fini della stima della resistenza al taglio di giunti in roccia. Nelle applicazioni, si deve tener conto della forte non linearità della resistenza al taglio dei giunti, per la dipendenza dei parametri di resistenza dallo stato tensionale.

Nei terreni sciolti, la permeabilità può essere effettuata direttamente in foro (in piezometri), o tramite prove tipo Lugeon (specie in argilliti giuntate e fessurate), o in piezometri, mediante prove a carico costante o variabile. In questo caso, è necessario assicurarsi della perfetta impermeabilità dei giunti.

Quando possibile, per la consistenza dei terreni e l'assenza di frammenti lapidei, possono essere effettuate prove penetrometriche che consentono di risalire ai valori della coesione non drenata, nei terreni a grana fina, e dell'angolo di attrito, in terreni più grossolani (ad esempio nelle coltri piroclastiche). In molti casi le prove penetrometriche

devono essere limitate ai soli strati più superficiali, per l'elevata consistenza dei terreni in gioco. In alcuni casi (specie in terreni argillitici a scaglie, di difficile campionamento) può essere utile l'esecuzione di prove pressiometriche ovvero di prove di taglio diretto in sito. Nella programmazione di tali indagini e poi, nell'elaborazione dei risultati, è necessario stimare i tempi di dissipazione delle pressioni neutre per la corretta definizione dei parametri meccanici richiesti.

Le prove meccaniche di laboratorio vanno eseguite su campioni indisturbati (classe Q5). Se si eccettua il caso di prove di taglio diretto su giunti in roccia, tali prove possono essere eseguite solo su campioni a grana fina.

Spesso le caratteristiche strutturali dei campioni impediscono un campionamento di classe di qualità adeguata. Per questo motivo, è necessario prelevare campioni di dimensioni elevate e, quando possibile, effettuare il campionamento direttamente da pozzi o trincee in cui può essere effettuato anche il campionamento di blocchi. Il campionamento da pozzi o trincee consente tra l'altro l'utilizzazione delle stesse fustelle di laboratorio, evitando così lo *stress* del doppio campionamento.

La sperimentazione di laboratorio include prove di permeabilità, prove di compressione edometrica, isotropa od anisotropa, prove di compressione triassiale eventualmente a percorso di sollecitazione controllato, prove di taglio diretto o anulare.

Le prove di permeabilità possono essere effettuate in permeometro, edometro o cella triassiale. Per la forte dipendenza della permeabilità dalla granulometria, è opportuno adoperare campioni di grande dimensione (diametro pari almeno a 10 cm) ed esplorare l'eventuale anisotropia della permeabilità. Quando non è possibile tener conto di queste indicazioni, è preferibile effettuare le misure in foro.

Le prove in permeometro sono sconsigliabili per l'elevata probabilità di errore, specie in terreni con permeabilità inferiore a 10^{-4} cm/s, e per l'impossibilità di correlare i valori misurati allo stato tensionale.

Le prove in edometro ed in cella triassiale possono essere eseguite a carico costante o variabile. In particolare, in cella triassiale, possono essere imposte quote piezometriche e gradienti idraulici molto variabili. Imporre il flusso idraulico dal basso verso l'alto.

Laddove si intenda operare con gradienti molto bassi è opportuno utilizzare una *flow pump*.

In terreni parzialmente saturi (es. coltri piroclastiche), la sperimentazione va effettuata tenendo conto della forte dipendenza della permeabilità dal grado di saturazione.

Nelle prove meccaniche, le condizioni di drenaggio vanno scelte in funzione del tipo di problema da affrontare e di considerazioni di natura squisitamente sperimentale. A questo fine, nelle prove a deformazione controllata, è molto importante la scelta della velocità di prova.

La dimensione dei provini deve essere tale da inglobare il maggior numero possibile di mesostrutture (elementi lapidei o a maggior consistenza, sacchette sabbiose, fessure). E' sempre auspicabile utilizzare provini di diametro superiore ai 50 mm.

Nelle prove a carico controllato, l'acquisizione delle misure di sforzo va effettuata dall'interno della cella triassiale, mediante cella di carico sommergibile. Anche per le misure di deformazione, fortemente soggette ad errori subsperimentali, specie per bassi livelli tensionali, sarebbe opportuna l'installazione di trasduttori interni.

In terreni saturi, è sempre opportuno eseguire prove in contropressione. Per assicurarsi la perfetta saturazione dei provini vanno sempre eseguite valutazioni del coefficiente B di Skempton.

In terreni parzialmente saturi, va tenuto conto della dipendenza dei parametri meccanici dal grado di saturazione, e vanno pertanto eseguite prove *ad hoc*.

In molti casi, la determinazione della resistenza critica (ad esempio, nel caso di argille sovraconsolidate soggette a rottura progressiva) e/o della resistenza residua (ad esempio, nel caso di frane attive o riattivate in terreni a grana fina) è di fondamentale importanza. Pur essendo teoricamente indipendenti dai parametri di stato (e quindi misurabili su provini ricostituiti in laboratorio), è opportuno misurare comunque queste grandezze su campioni indisturbati.

Le misure di stato tensionale possono essere utilizzate nella modellazione numerica del comportamento dei pendii. Esse sono di difficile realizzazione e vengono quindi effettuate solo in casi particolari e con tecniche sofisticate (*overcoring*, martinetto piatto, fratturazione idraulica, con pressiometro autoperforante ecc.).

3.7. Monitoraggio strumentale

Il monitoraggio rappresenta uno strumento fondamentale di conoscenza dell'evoluzione

geomorfologica del territorio che si integra col presidio territoriale.

Il monitoraggio strumentale richiede un apposito progetto che precisi e giustifichi tipo, numero e *layout* degli strumenti, oltre che la frequenza e le modalità delle misure. Tale progetto va redatto da un ingegnere geotecnico di documentata esperienza nel campo e deve essere approvato dagli organi competenti.

Una volta approvato il progetto, il programma di monitoraggio strumentale può essere affidato ad una ditta di comprovata esperienza.

Il monitoraggio viene utilizzato per:

- a) la valutazione delle attuali condizioni di stabilità dei versanti e della loro possibile evoluzione;
- b) l'utilizzazione di sistemi di allerta e di allarme;
- c) la scelta dei più opportuni sistemi di consolidamento.

La finalità a) ha la funzione di verifica ed ulteriore approfondimento dei risultati dei rilievi e dei sopralluoghi svolti e dei dati forniti dai presidi territoriali.

Mediante la messa in opera di strumenti di adeguate caratteristiche, capaci di misurare con elevata precisione le intensità di pioggia ed i livelli piezometrici in punti significativi del sottosuolo, gli spostamenti superficiali e profondi delle coltri instabili o a rischio di frana, l'apertura di fratture e fessure, eventuali stati di sforzo sulle strutture presenti nelle aree a rischio, è possibile tenere sotto controllo sia le azioni in grado di produrre instabilità che i corrispondenti comportamenti dei versanti.

Il controllo continuo di questi ultimi consente di decidere le più opportune azioni da intraprendere per la *mitigazione* del rischio.

Sistemi di allerta o di allarme (finalità b) vengono adottati in tutte le situazioni di pericolo imminente in cui non sia possibile la delocalizzazione degli insediamenti e delle infrastrutture e fino a che non siano state realizzate opere definitive di consolidamento.

Tali sistemi sono basati sul monitoraggio di alcuni parametri fisici caratteristici del fenomeno (intensità di pioggia, pressioni neutre o suzioni in alcuni punti del sottosuolo, apertura delle fessure in un ammasso roccioso ecc.) caratteristici dei fenomeni in atto e

che si valuta ne controllino l'evoluzione.

L'allerta è indicativa di uno scenario di possibile aggravamento del rischio ed impone:

- un accrescimento della sorveglianza;
- la valutazione continua della situazione da parte di specialisti;
- il coinvolgimento delle autorità responsabili della sicurezza;
- lo stato di pre-allerta per un piano di soccorsi.

L'allarme è il segnale che annuncia l'esistenza di un pericolo imminente e che avvia l'esecuzione di misure di urgenza.

I risultati del monitoraggio, uniti a quelli derivanti dall'attività del presidio territoriale, consentono, infine, di raccogliere gli elementi necessari per la progettazione degli interventi di consolidamento dei pendii instabili (finalità c). Ulteriori dati vanno eventualmente raccolti in specifiche indagini *ad hoc*.

Il monitoraggio riguarda tutte le grandezze fisiche che consentano di ricostruire ovvero controllino il comportamento dei movimenti franosi, come ad esempio:

- condizioni ambientali (temperature, piogge, neve, accelerazioni al suolo);
- pressioni neutre al di sotto del pelo libero della falda idrica;
- eventuali suzioni al di sopra del pelo libero della falda idrica;
- portate e qualità dell'acqua;
- spostamenti assoluti del piano di campagna;
- spostamenti assoluti in profondità;
- spostamenti relativi tra punti appartenenti al corpo di frana;
- sforzi su elementi strutturali;

La scelta del tipo di sensori dipende dalle caratteristiche dei fenomeni che si intende osservare. Essi devono avere adeguate caratteristiche di sensibilità, durabilità e stabilità nel tempo che deve essere giustificata dal progettista.

La durata del monitoraggio deve essere di norma quella sufficiente a raccogliere i dati

necessari per il raggiungimento delle finalità dell'indagine. Nel caso queste consistano nella elaborazione di un progetto di consolidamento, è buona norma estendere il periodo di misure fino alla esecuzione del progetto ed eventualmente anche dopo, perché la strumentazione possa acquisire la funzione di controllo della efficacia degli interventi stessi.

In molti casi, e soprattutto quelli in cui i segnali premonitori dei fenomeni franosi sono deboli e di breve durata (tipicamente per i crolli in roccia e le colate di detrito), è opportuno adottare sistemi in continuo con trasmissione dei dati via cavo o etere.

Le condizioni ambientali sono considerate il principale fattore di innesco dei movimenti franosi. Nelle aree di interesse, sismicità e piogge rappresentano di gran lunga i fattori di maggior rilievo.

Nel primo caso, il monitoraggio mediante accelerografi è certamente utile per approfondire la conoscenza del comportamento dei pendii, ma nel nostro caso ha scarsa utilità ai fini della previsione di possibili fenomeni di frana per la rapidità con cui essi evolvono.

Nel secondo caso, il monitoraggio si presenta di maggiore utilità, certamente nell'uso di modelli previsionali “a scatola chiusa”, ma sempre più, anche in quello di modelli più sofisticati capaci di mettere in relazione piogge, pressioni neutre e spostamenti. In molti casi (come è stato in occasione della emergenza Sarno) il rilievo della piovosità può essere utilizzato come fattore chiave per la messa a punto di sistemi di allerta e di allarme.

Per tali rilievi è necessaria l'installazione di stazioni meteorologiche o di semplici pluviografi. Tali stazioni, come tutti gli altri strumenti, vanno protette, per quanto possibile, da atti di vandalismo. Nei casi in esame è opportuna l'installazione di pluviografi per il controllo in continuo del regime delle piogge.

Le quote piezometriche, e quindi le pressioni neutre al di sotto del pelo libero della falda idrica o le suzioni al di sopra dello stesso pelo libero, controllano direttamente la resistenza al taglio dei terreni e quindi le condizioni di stabilità.

Ancora più e più direttamente della piovosità, le quote piezometriche possono essere correlate alle deformazioni dei pendii ed ai fenomeni di instabilità.

La conoscenza la distribuzione delle pressioni neutre, inoltre, consente la messa a punto

di interventi di consolidamento dei versanti.

Come descritto in precedenza, le misure vengono effettuate mediante piezometri ovvero tensiometri (questi ultimi solo per la misura della suzione). Esiste in commercio un gran numero di strumenti con caratteristiche anche molto diverse. La scelta dello strumento più adatto, delle modalità di installazione e della migliore ubicazione del sensore, dipendono da una serie di fattori di ordine tecnico ed economico.

Questi strumenti vanno adeguatamente protetti da possibili azioni esterne (non necessariamente legate ad atti di vandalismo) che ne alterino il funzionamento o le mettano fuori uso: nel caso di piezometri idraulici, i tubi vanno isolati dall'esterno per evitare l'accesso di acqua direttamente dal piano di campagna; nel caso di piezometri elettrici, i cavi devono essere protetti da possibili tranciamenti prodotti ad esempio da animali, da macchine in movimento ecc.

La misura di portate di flussi idrici e delle relative caratteristiche, che può essere fatta mediante strumenti anche semplici, può rappresentare un utile elemento di conoscenza di possibili fattori di instabilità o di individuazione delle cause di un movimento franoso.

Affioramenti idrici possono essere collegati a fenomeni di instabilità ovvero indicare la perdita da serbatoi, condotte, canali ecc.

La determinazione della qualità dell'acqua mediante analisi chimiche può aiutare a ricostruirne l'origine.

La misura degli spostamenti del piano di campagna risponde all'esigenza di verificare l'esistenza di movimenti in atto, di caratterizzare la cinematica superficiale di eventuali movimenti franosi, di definire la possibilità concreta di interventi manutentivi o di consolidamento o addirittura di prevedere il momento del collasso.

Il rilievo dei movimenti superficiali può essere effettuato mediante strumenti topografici di precisione o con una rete di misure da satellite GPS. I relativi picchetti, compresi quelli esterni ad eventuali zone instabili, vanno saldamente infissi nel terreno e protetti da possibili azioni esterne.

Le misure di spostamenti profondi, oltre alla funzione di riconoscere l'eventuale esistenza di movimenti franosi, consentono di determinarne lo spessore e di approfondire le conoscenze della loro cinematica.

Le misure vengono effettuate mediante sonde inclinometriche, le più recenti delle quali consentono di misurare tutte e tre le componenti del vettore spostamento.

I tubi inclinometrici vanno tappati e protetti da azioni esterne che potrebbero falsare le misure, specie quelle più superficiali.

Anche la misura di spostamenti relativi tra punti può essere un modo per riconoscere l'esistenza di movimenti e per risalire alla cinematica ed ai meccanismi dei movimenti.

Essa viene effettuata mediante estensometri, fessurimetri ecc.

La misura di sforzi sulle o nelle strutture rappresenta una indicazione della esistenza di movimenti e dei loro effetti sui manufatti. In particolare, la conoscenza dello stato tensionale agente nelle strutture consente di valutarne l'efficienza e di prendere in esame una loro eventuale sostituzione o rinforzo. Nel caso di opere di consolidamento, tali misure possono essere utilizzate nell'ambito dell'applicazione del metodo osservazionale, per valutare l'opportunità di una integrazione ed un miglioramento complessivo del sistema di stabilizzazione. Gli strumenti di misura più diffusi sono le celle di carico e gli estensimetri.

3.8. Interventi

Gli interventi di consolidamento vanno realizzati in tutte quelle zone, caratterizzate da una elevata pericolosità, dove non è possibile ottenere una significativa mitigazione del rischio mediante soluzioni alternative e più economiche (manutenzione del territorio e delle opere esistenti su di esso, sistemi previsionali, diversa destinazione d'uso delle aree ecc.).

La tipologia degli interventi di consolidamento dipende dalle specifiche caratteristiche del sito nell'area da stabilizzare (natura e struttura degli affioramenti, regime delle acque sotterranee, proprietà dei terreni), dalle potenziali cause innescanti e dai possibili meccanismi di frana.

Nel seguito, vengono descritti i principali metodi di consolidamento utilizzabili nelle aree suscettibili di frana presenti nell'ambito del territorio di competenza dell'Autorità di Bacino. Detti interventi vengono distinti in relazione ai più diffusi meccanismi di frana riconosciuti nello stesso territorio.

Nelle Tav. A1, A2 e A3 vengono indicati gli schemi di intervento distinti per tipologia

di fenomeni franosi. Gli schemi, evidentemente, devono intendersi come indicativi e qualitativi in quanto la scelta dell'intervento più idoneo da realizzare dipende dalle specifiche caratteristiche del sito nell'area da stabilizzare (natura e struttura degli affioramenti, regime delle acque sotterranee, proprietà fisiche e meccaniche dei terreni), dalle potenziali cause innescanti, dai possibili meccanismi di collasso, dalla possibilità di accesso ai luoghi, da considerazioni di carattere economico. Ciò potrebbe comportare, tra l'altro, la combinazione di più tipologie tra quelle riportate negli elaborati grafici allegati e qui di seguito discusse.

3.8.1. Crolli in roccia

Nei casi in cui i fenomeni di instabilità attesi siano costituiti da crolli in roccia fratturata, secondo meccanismi di scivolamento o di ribaltamento nessuna mitigazione del rischio è possibile nella fase immediatamente successiva all'innescamento per l'elevata velocità dei volumi mobilizzati.

Per questo motivo, gli interventi devono essere di tipo preventivo, da realizzare cioè prima dell'innescamento, nelle aree giudicate suscettibili di frana (riduzione della pericolosità), ovvero di protezione passiva delle aree a rischio (riduzione della vulnerabilità). In alternativa agli interventi, possono essere utilizzati diversi criteri di gestione del territorio, quali: la modifica della destinazione d'uso dell'area di possibile invasione, ovvero sistemi di allerta e di allarme.

I possibili interventi per la mitigazione del rischio nelle aree giudicate suscettibili di frana includono la rimozione dei potenziali volumi instabili ovvero il loro consolidamento in sito mediante opere di vario tipo.

La rimozione dei potenziali volumi instabili, che può essere anche oggetto della manutenzione ordinaria, può essere ottenuta mediante scavi eseguiti a mano, o con escavatori, ovvero mediante esplosivo, miscele espansive ecc. Un recente esempio della efficacia di tali interventi è rappresentato dalla rimozione, mediante esplosivi, di un enorme blocco di roccia che minacciava la sottostante strada statale sorrentina, ricadente nel territorio di competenza dell'Autorità di Bacino del Sarno.

Il consolidamento in sito delle zone potenzialmente instabili può essere ottenuto mediante interventi di vario tipo da scegliersi in funzione della morfologia e

dell'accessibilità dei luoghi, dei previsti meccanismi di rottura, delle caratteristiche meccaniche dei materiali, del costo degli interventi stessi ecc.

Tra gli interventi più diffusi, si possono citare: la stabilizzazione dei blocchi potenzialmente instabili mediante muretti di sostegno, speroni ed opere analoghe; l'imbracaggio dei blocchi stessi mediante funi metalliche e/o reti ancorate al suolo; il loro consolidamento mediante chiodi, ancoraggi attivi o passivi, travi ancorate, placcaggi, calcestruzzo proiettato ecc.

Il consolidamento mediante opere di sostegno è possibile solo se è assicurata l'accessibilità ai luoghi e se la morfologia dell'area consente la realizzazione di tali opere.

L'imbracaggio mediante funi metalliche è efficace solo nel caso di roccia non particolarmente fratturata; in alternativa., è necessario il ricorso alle reti che possono essere integrate da molteplici sistemi di rinforzo quali funi, ancoraggi, etc.

La realizzazione di ancoraggi o chiodi dipende essenzialmente dall'accessibilità dei luoghi da parte di uomini e macchine. La scelta della tecnologia più opportuna è funzione del tipo di meccanismo possibile e dello spessore dei volumi potenzialmente instabili (ad es. crollo di blocchi o scivolamento di lastre di roccia seguito da crollo). Se la roccia è molto fratturata, è opportuno ricorrere a travi ancorate, placcaggi o a calcestruzzo proiettato, che consentono di estendere, all'intero fronte trattato, l'effetto stabilizzante degli ancoraggi. La scelta dell'uno o dell'altro intervento dipende dalle possibilità di accesso e da motivazioni di ordine economico.

Il progetto di questi interventi richiede una accurata indagine preliminare di tipo strutturale consistente nel riconoscimento delle famiglie di discontinuità, tramite rilievi di direzione, inclinazione ed immersione, e rilievi della spaziatura e della persistenza, e nella definizione dei parametri fisici delle discontinuità (rugosità, resistenza a compressione della roccia in prossimità delle labbra, angolo di attrito di base ecc.). Il riconoscimento delle famiglie di discontinuità e delle loro caratteristiche geometriche e spaziali è necessario per la definizione dei possibili meccanismi di rottura; quello dei parametri fisici delle singole discontinuità può essere utile nella utilizzazione di espressioni semi-empiriche della resistenza al taglio (come quella di Barton o quella di Ladanyi e Archambault) qualora non sia possibile procedere alla misura diretta della

resistenza stessa tramite prove di taglio diretto in sito od in laboratorio.

Il progetto consisterà nel proporzionare opere strutturali la cui resistenza aggiuntiva sommata a quella propria del materiale potenzialmente instabile (resistenza a trazione di ponti integri, e resistenza al taglio lungo la superficie di scorrimento) risulti congruamente superiore alle forze instabilizzanti dovute alla gravità. Su questo argomento, ed in particolare sui valori dei coefficienti di sicurezza da adottare nella progettazione degli interventi di consolidamento, la Normativa non si esprime. E', comunque, ovvio che le opere strutturali siano progettate adottando i coefficienti di sicurezza proposti per esse dalla relativa Normativa in quanto opere strutturali, assumendo come note le azioni da esse assorbite. Cautelativamente, queste, a loro volta, potranno essere calcolate mediante *back-analysis*, assumendo che la resistenza del terreno sia tale da consentire di ottenere un coefficiente di sicurezza prossimo all'unità prima dell'intervento di consolidamento.

Tra gli interventi passivi, si citano:

- reti, barriere ed argini paramassi;
- letti smorzanti;
- gallerie paramassi.

Reti, barriere ed argini paramassi sono tutti interventi finalizzati all'arresto del moto del blocco nella sua corsa. Reti e barriere vengono in genere realizzate mediante elementi metallici continui di elevata deformabilità, assemblati in modo da esaltare la deformabilità dell'insieme, incluse le fondazioni, allo scopo di trasformare l'energia cinetica trasmessa dal blocco nel suo impatto in energia di deformazione del sistema. Gli argini sono manufatti di terra, a volte rinforzata con elementi metallici o plastici, che hanno la stessa funzione precedentemente descritta, di assorbimento dell'energia di impatto dei blocchi che vengono intercettati.

I letti smorzanti sono costituiti da strati di terreno naturale (in genere granulare) di adeguato spessore e modesta densità relativa, disposti nelle zone di impatto e capaci di arrestare il moto di un blocco smorzandone l'energia cinetica nel momento dell'impatto. Le gallerie paramassi vengono in genere realizzate lungo tracciati stradali con la sola

funzione di proteggere la sede stradale dall’impatto di massi cadenti dall’alto. A volte sulla copertura viene messo in opera un letto smorzante.

Il progetto di queste opere non può prescindere da una valutazione del comportamento dei blocchi nella fase post-rottura. L’analisi delle traiettorie e delle velocità assunte dai blocchi stessi (cinematismo), può essere effettuata mediante un approccio basato sullo studio del moto di un punto materiale in cui viene concentrato il peso. Mediante analisi più sofisticate possono essere considerate la forma e la resistenza dei blocchi oltre che la risposta elastica del suolo ad ogni impatto. Il progetto delle opere di protezione, che hanno la funzione di assorbire l’energia cinetica trasmessa dal blocco, trasformandola in energia di deformazione del sistema struttura-terreno di fondazione, va effettuato in base a criteri di tipo energetico. Anche il dimensionamento geometrico di queste opere (ad esempio l’altezza delle barriere paramassi) va effettuato solo a seguito di un’analisi della traiettoria dei blocchi (che non devono scavalcare le opere disposte lungo il loro percorso).

L’adozione delle tipologie di intervento ora descritte va adattata alla situazione dei luoghi e guidata dalla esperienza del progettista. Questi, tra l’altro, potrà adottare anche una combinazione di più tipologie, il cui effetto integrato risulti particolarmente efficace, o altre tipologie ancora non citate in questa sede.

3.8.2. Colate di detrito e di fango

La problematica della scelta degli interventi da adottare in aree soggette a colate di detrito (costituite da materiali essenzialmente incoerenti a grana grossa) o di fango (costituite essenzialmente da sabbie e limi spesso inizialmente parzialmente sature) non si discosta da quella descritta per il caso dei crolli. Anche in questo caso, infatti, la velocità dei movimenti attesi è tanto elevata (dell’ordine dei m/s) che non è possibile immaginare la realizzazione di interventi di consolidamento nel corso dei movimenti. Pertanto, le metodologie possibili contemplano, ancora una volta, il ricorso ad opere attive di consolidamento, allo scopo di prevenire la franosità in aree giudicate a stabilità precaria, ovvero interventi passivi finalizzati alla protezione dei beni vulnerabili.

Gli interventi attivi hanno la funzione di mitigare le cause di innesco ovvero di consolidare i potenziali corpi di frana. A tale fine, la previsione dei possibili

meccanismi di innesco, che soprattutto per le colate di fango, è ancora oggetto di dibattito, è di fondamentale importanza nella scelta dei corrispondenti interventi attivi di consolidamento.

Nel caso delle colate di detrito, spesso l’innesco dei movimenti è determinato da afflussi concentrati di acqua capaci di mobilitare e trascinare verso valle masse di detrito depositate in vallecole ubicate in quota e in impluvi montani.

In questo caso, gli interventi attivi potranno consistere in:

- opere idrauliche per il controllo delle acque superficiali e sub-superficiali;
- interventi di rimozione di materiale suscettibile a franare;
- interventi di tipo forestale;
- briglie disposte lungo il tracciato di impluvi montani riempiti di materiali suscettibili a franare;
- opere di sostegno in muratura, calcestruzzo, terra rinforzata o mediante paratie di pali o di micropali;
- chiodature (*nailing*).

Le opere di canalizzazione (canali di gronda, canalette, trincee) hanno la funzione di raccogliere e regolare i deflussi superficiali, evitando portate concentrate di acqua capaci di produrre rapida erosione e trasporto solido. Per il loro progetto è necessario un accurato studio dei deflussi superficiali (corrivazione). Un buon progetto può ridurre enormemente i volumi di acqua che a volte convergono in zone morfologicamente depresse e riempite di materiale detritico, limitando al massimo il rischio di frana.

La rimozione di materiale, che può essere oggetto anche di interventi di manutenzione ordinaria, è necessaria in tutte quelle situazioni in cui si riconosca la suscettibilità a franare di volumi di materiale sciolto, ad esempio accumulato in terrazzi e vallecole ubicate in quota ovvero all’interno di impluvi montani. La possibilità di realizzazione di questi interventi è a volte limitata da problemi di accesso.

Gli interventi di tipo forestale hanno la funzione, sia di controllare le acque superficiali ed i fenomeni di erosione, che di impedire frane di limitato volume che, in determinate situazioni morfologiche, possono trasformarsi in fenomeni catastrofici per la loro

capacità di coinvolgere i detriti accumulati lungo il pendio o più a valle. In molti casi (zone con elevata pendenza, substrato lapideo), questi interventi pongono grossi problemi di realizzazione dovuti alla difficoltà di attestare le fondazioni ai terreni di base.

Le briglie vengono disposte all'interno degli impluvi e possono avere sia una funzione attiva (come elementi di contenimento) che passiva (come interventi di protezione). Nel primo caso, esse fungono da opere di contenimento e sostegno del materiale detritico che si accumula negli impluvi. Esse vanno pertanto proporzionate come qualsiasi opera di sostegno immaginando il riempimento completo dell'impluvio a tergo della briglia.

Le strutture di sostegno hanno la stessa funzione degli interventi di tipo forestale prima richiamati e delle briglie (nella versione di interventi di tipo attivo), ma un maggiore impegno statico, rispetto ai primi, e una più ampia possibilità di realizzazione (ad esempio, al di fuori delle zone occupate da impluvi montani), rispetto alle seconde.

Le tipologie possibili sono assai varie ed includono sia opere fuori terra, come i muri (sia in pietrame che in calcestruzzo), le Terre Armate o le “terre rinforzate”, che entro terra (come le paratie). Ciascuna di queste categorie è caratterizzata da un'ampia varietà di sistemi di realizzazione, la cui scelta andrà effettuata in relazione ai vincoli di tipo logistico (possibilità di accesso per gli uomini, i mezzi ed i materiali), tecnico (geomorfologia e natura dei terreni) ed economico. Spesso sono sufficienti interventi anche modesti, ma opportunamente ubicati e mantenuti, per risolvere in maniera brillante situazioni di potenziale rischio.

Le chiodature (*nailing*) sono interventi consistenti nella introduzione nel terreno di barre metalliche opportunamente protette dalla corrosione, micropali o pali isolati con funzione di sostegno o rinforzo delle coltri superficiali soggette al pericolo di frana.

Per la progettazione di questi interventi, caratterizzati dalle più varie possibilità di disposizione in pianta, sono stati elaborati criteri di analisi basati sia sul metodo dell'equilibrio limite che con modelli sofisticati in campo elasto-plastico capaci di considerare il regime deformativo di tali strutture (le Raccomandazioni francesi *Clouterre* sono a questo proposito molto complete).

Il controllo delle colate di fango che tanti problemi hanno recentemente creato nella nostra Regione, si presenta più complesso per l'incertezza che ancora avvolge i

meccanismi di innesco, spesso provocati da fenomeni piovosi eccezionali. Numerose sono le ipotesi avanzate per spiegare l'innesco di questi fenomeni e la loro rapida evoluzione in colate di fango. Nessuna può essere esclusa, ed anzi, è possibile che siano effettivamente diverse le cause di alcuni di questi fenomeni in relazione al “peso” dei vari fattori in gioco.

In base a dati raccolti nell'area dominata dal Pizzo d'Alvano funestata dagli eventi del Maggio 1998, è possibile che, specie nel caso di coltri piroclastiche ricoprenti formazioni calcaree fratturate, ovvero attraversate da livelli pumicei continui più permeabili, l'innesco possa essere provocato da sottospinte idrauliche connesse ad infiltrazione idrica sia dai calcari di base che dalle intercalazioni pumicee. Non va, comunque, trascurato che un analogo meccanismo di infiltrazione dal basso, caratterizzato da modesti carichi idraulici, potrebbe fungere da alimentazione di una falda idrica alla base dei terreni piroclastici, ugualmente capace di mobilitarli. La riduzione della suzione negli strati superiori parzialmente saturi, per effetto della loro progressiva saturazione dovuta alla infiltrazione dall'alto è un'altra possibile causa di innesco. E' da sottolineare altresì il meccanismo della erosione concentrata, molto intensa e rapida in terreni sabbio-limosi come quelli in questione, e capace di produrre le condizioni per l'innesco e la propagazione dei fenomeni di rottura all'interno delle coltri superficiali.

A seconda del manifestarsi o della prevalenza dell'uno o dell'altro di questi fenomeni, le masse di terreno inizialmente mobilitati possono essere grandi o piccole; l'esperienza mostra comunque che, anche nella seconda ipotesi, nella sua fase evolutiva post-rottura la frana è in grado di coinvolgere ingenti volumi di terreno disposti più a valle lungo la propria traiettoria.

Naturalmente, il tipo di meccanismo possibile condiziona la scelta degli interventi attivi per la mitigazione del rischio. E' comunque sempre opportuno limitare le possibilità di innesco mediante opere non necessariamente di rilevante impegno economico.

La tipologia dei possibili interventi non si discosta molto da quelle precedentemente descritte per le colate di detrito. Naturalmente, in quelle situazioni in cui si ipotizza che la frana possa essere provocata da sottospinte idrauliche, sono necessari interventi di drenaggio con la funzione di abbattere le quote piezometriche negli strati più permeabili

ovvero nelle formazioni sottostanti. In qualche caso potrebbero essere adoperate trincee drenanti, più spesso drenaggi profondi (tipicamente dreni tubolari forati), per la descrizione dei quali si rimanda al paragrafo successivo.

In molti casi, opere di difficile realizzazione o di dubbia efficacia nelle coltri detritiche, come quelle di tipo idraulico-forestale, di regimazione capillare delle acque superficiali o di sostegno (per la presenza di un substrato lapideo), sono di più facile realizzazione nel caso delle coperture piroclastiche.

Tra gli interventi passivi, utilizzabili sia nel caso delle colate detritiche che nelle colate di fango, si citano:

- briglie;
- spianate finalizzate allo smorzamento della velocità del flusso;
- vasche di accumulo o di laminazione;
- canali di diversione;
- argini e barriere di tipo strutturale.

Disposte sempre negli impluvi, liberi (o liberati) della presenza di terreni di riempimento, nel caso vengano utilizzate come interventi passivi, le briglie assumono la funzione di dissipatori di energia. In tal caso, le tipologie ricorrenti sono quelle “a griglia”. In questo caso, la progettazione delle briglie va effettuata in base a criteri energetici ed andrebbe verificata mediante modellazione fisica.

La realizzazione delle aree di spianata è tesa alla riduzione dell’energia cinetica del materiale in arrivo mediante la modifica della morfologia delle zone di possibile invasione (che vengono spianate), spesso poste agli sbocchi di impluvi. La minore pendenza di queste aree favorisce il rallentamento dei movimenti e la diffusione del materiale in arrivo, spesso incanalato, con forma “a ventaglio”

La progettazione delle spianate può essere basata su criteri di tipo idraulico e verificata mediante modellazione fisica. Essenziale ai fini della progettazione è la stima dei volumi mobilitati.

Le vasche di accumulo o di laminazione consistono in scavi da realizzare lungo il possibile tracciato della colata, con la funzione di assorbire il fango (vasche di

accumulo) ovvero smorzarne la velocità (vasche di laminazione). Poiché gli impluvi montani nella maggior parte dei casi trasportano acqua, le vasche di accumulo devono essere progettate in modo da lasciarla comunque defluire a valle

La progettazione di questi manufatti deve essere basata su approcci di tipo idraulico in cui è essenziale la stima del volume di materiale mobilitato e della sua velocità. E' raccomandabile la verifica della funzionalità del sistema mediante modellazione numerica e fisica.

Le opere di deviazione rappresentano strutture con funzione di convogliare il flusso di colata verso zone prive di elementi a rischio. Tali opere possono essere sia tipo strutturale che geotecnico (in terra). Il corretto funzionamento di questi manufatti dipende dalla loro tipologia, posizione e dalle caratteristiche geometriche.

3.8.3. Scorrimenti in argilla

Gli scorrimenti ed i colamenti vengono qui trattati unitariamente perché i corrispondenti meccanismi sono solo relativamente differenti e le tipologie di intervento sono spesso simili.

Le frane in argilla sono generalmente caratterizzate da velocità minori dei crolli in roccia e delle colate di detrito o di fango). Le velocità maggiori caratterizzano gli scorrimenti di primo distacco ed i colamenti nella fase parossistica di immediata post-rottura. In questi casi, possono essere raggiunte velocità fino a qualche m/ora. Negli altri casi, le velocità raramente superano qualche m/giorno e sono sovente dell'ordine dei m/mese fino ai cm/anno. Va inoltre considerato che i soli colamenti hanno significative capacità di propagazione sui pendii, mentre la distanza percorsa dagli scorrimenti è generalmente limitata a qualche metro o al massimo a qualche decina di metri.

Questi aspetti del comportamento delle frane in argilla pongono il problema del rischio in termini differenti che nei casi precedenti. Infatti, per lo meno nel caso degli scorrimenti, il rischio è limitato esclusivamente all'area direttamente coinvolta dal collasso. Solo nel caso dei colamenti, infatti, la capacità del corpo di frana di propagarsi lungo il pendio mette a rischio aree sottese dalla zona del dissesto, ma la velocità con cui la frana si propaga consente di mitigare i danni, sia mediante l'evacuazione di uomini e cose, che mediante la realizzazione di interventi di consolidamento, possibili

nel corso stesso degli eventi. Dopo l’arresto dei movimenti, è comunque spesso necessario eseguire delle opere definitive di consolidamento allo scopo di limitare la possibilità di fenomeni di riattivazione, tipici dei terreni argillosi, la cui resistenza al taglio subisce una drastica riduzione lungo la superficie di scorrimento (resistenza residua).

La tipologia dei possibili interventi di consolidamento di frane in argilla (siano esse di tipo scorrimento che di tipo colamento) è molto varia e dipende notevolmente dalle condizioni iniziali (morfologia, dell’area, struttura del sottosuolo, meccanismi di rottura e geometria del corpo di frana, regime delle acque sotterranee, proprietà dei terreni) e dalle cause di innesco.

Nel caso degli scorrimenti, sono necessari interventi di tipo attivo, sia con funzione preventiva (allo scopo di prevenire il collasso), che curativa (durante i movimenti, per mitigarne gli effetti e possibilmente stabilizzare il corpo di frana), che di stabilizzazione definitiva (allo scopo di evitare fenomeni di riattivazione). Solo nel caso dei colamenti si possono prendere in esame interventi di difesa passiva che, comunque, non sono spesso necessari per la frequente possibilità di arresto dei movimenti mediante interventi attivi di consolidamento.

Gli interventi attivi possono essere finalizzati sia alla riduzione delle azioni instabilizzanti, che all’incremento delle azioni stabilizzanti.

Tra le azioni instabilizzanti, si possono citare gli eventi meteorici (che influenzano direttamente il regime delle acque sotterranee e quindi la resistenza al taglio dei terreni), gli eventi sismici, l’erosione, il decadimento delle proprietà meccaniche dei terreni (per effetto dell’alterazione, del *softening* e, talvolta, anche dell’immissione di sostanze inquinanti) e le azioni antropiche.

La riduzione delle azioni instabilizzanti deve essere quindi diretta verso tutte le cause ora citate e può essere ottenuta sia mediante un’attenta e continua manutenzione e gestione del territorio (basata tipicamente sul controllo delle acque di ruscellamento e dell’erosione, la pulizia dei fossi, la sigillatura di fratture ecc.), che mediante interventi *ad hoc*, come drenaggi profondi (per il controllo delle acque sotterranee), briglie, gabbionate, muretti, inerbimenti ecc.

Quando non è possibile un adeguato controllo delle cause di innesco, è necessario

eseguire interventi specifici. Tipicamente, è possibile ridurre i carichi instabilizzanti mediante movimenti di terra finalizzati al rimodellamento dei versanti. Questi consistono in riprofilature, terrazzamenti, gradonature, scavi, capaci di ridurre le sollecitazioni dovute al peso proprio dei terreni.

Il progetto di questi interventi può essere effettuato con i classici metodi dell'equilibrio limite, capaci di definire con chiarezza l'influenza sul coefficiente di sicurezza della distribuzione dei carichi sul pendio.

L'incremento delle forze stabilizzanti può essere ugualmente ottenuto mediante movimenti di terra, oppure con sostituzione di materiale, miglioramento dei terreni, drenaggi, opere di sostegno, chiodature, ancoraggi, ecc.

In questo caso, i movimenti di terra consistono nella realizzazione di berme o di riempimenti al piede del versante, con la funzione, sia di riequilibrare la distribuzione dei carichi sul pendio, che di incrementare l'aliquota di resistenza al taglio dovuta all'attrito. Questo tipo di interventi è particolarmente opportuno quando il cinematismo del corpo di frana è di tipo rotazionale; è invece inadatto nel caso di movimenti traslativi. Esso può essere molto efficace come intervento curativo nel corso stesso dei movimenti annullandoli o comunque riducendone la velocità. I movimenti di terra sono condizionati dall'entità dei volumi di terreno da movimentare.

Una buona progettazione di tali interventi può essere effettuata mediante i classici metodi dell'equilibrio limite.

La sostituzione di materiale può essere realizzata solo quando i volumi da sostituire sono modesti, e soprattutto nel caso in cui l'intervento riguardi spessori modesti di terreno. In questo caso, la sostituzione viene effettuata mediante scavi o pozzi spinti al di sotto della superficie di scorrimento. Questi interventi sono efficaci soprattutto nel caso di fenomeni riattivati (caratterizzati da bassa resistenza al taglio mobilitata) utilizzando per la sostituzione materiali grossolani dotati di elevato attrito. La progettazione può essere effettuata utilizzando i metodi dell'equilibrio limite.

Interventi tesi a migliorare le caratteristiche dei terreni mediante iniezioni, elettroosmosi, *jet grouting*, pali di calce, cottura delle argille sono raramente realizzabili per difficoltà tecnologiche e comunque solo nel caso di frane di modeste dimensioni. E' opportuna la verifica della efficacia degli interventi mediante campi prova.

I drenaggi, sia superficiali (trincee drenanti) che profondi (setti, tubi, pozzi, gallerie drenanti) hanno la funzione di ridurre le pressioni neutre, incrementando il regime delle tensioni efficaci. Naturalmente, essi hanno efficacia solo nel caso in cui le pressioni neutre alla base del movimento franoso assumano valori significativi.

Le trincee drenanti raggiungono raramente profondità superiori a 4-5 m e sono realizzate mediante escavatori. Esse vengono disposte generalmente secondo file parallele o “a spina di pesce”, comunque sempre secondo la massima pendenza del versante. Una diversa disposizione planimetrica è possibile soltanto in presenza di conoscenze accurate sul regime delle acque sotterranee. Le trincee drenanti sono particolarmente efficaci nel caso dei movimenti traslativi su versanti di modesta pendenza, ma non è opportuno realizzarle su pendii caratterizzati da movimenti rapidi capaci di disarticolare i dreni prima che essi abbiano il tempo di entrare in funzione. Esse vanno opportunamente protette, mediante filtri o geotessili, da fenomeni di “contaminazione”.

Quando devono essere raggiunte profondità più importanti, possono essere realizzati setti drenanti, che hanno lo stesso funzionamento delle trincee drenanti, ma vengono realizzati da speciali macchine, la cui possibilità di accesso è quindi essenziale ai fini dell'intervento.

Il progetto di trincee e setti drenanti richiede adeguate conoscenze del regime delle acque sotterranee e può essere sviluppato per via numerica o utilizzando abachi validi, però, solo per casi particolari. Nella progettazione, è importante tenere conto dei tempi necessari per raggiungere l’“efficienza” richiesta.

I tubi drenanti vengono realizzati su pendii più inclinati e spesso in congiunzione con altri interventi (muri, paratie, pozzi). Vanno opportunamente protetti da fenomeni di intasamento mediante “calze” di geotessile.

Questi interventi vengono progettati mediante approcci numerici o utilizzando abachi validi solo per casi particolari. Anche in questo caso, nella progettazione è importante tenere conto dei tempi necessari perché sia raggiunta l’“efficienza” richiesta.

I pozzi drenanti possono essere di piccolo ($d=1-1.5$ m) e di grande diametro (fino a 10-15 m) e raggiungono profondità di 8-10 m, nel primo caso, anche molto maggiori nel secondo. Nel primo caso, tranne alcuni elementi che vengono rivestiti per consentirne

l'ispezione, i pozzi vengono riempiti di materiale arido e disposti in fila secondo la linea di massima pendenza; sono, inoltre, collegati in basso mediante un tubo collettore col quale viene ottenuto lo scarico per gravità dell'acqua drenata. Nel secondo caso, i pozzi sono sostenuti da paratie di pali disposte ad anello spesso rinforzate con travi ad anello interne. Hanno quindi, anche una funzione strutturale. I pozzi sono sovente integrati con tubi drenanti realizzati a partire dal fondo. Essi sono spesso isolati o realizzati in piccolo numero. Lo scarico delle acque raccolte va effettuato mediante pompe.

Il progetto strutturale dei pozzi viene realizzato previa valutazione della spinta esercitata dai terreni circostanti. Tra le forze resistenti, vanno tenute in conto anche le reazioni del terreno sotto la base.

Cunicoli e gallerie drenanti consentono di raggiungere grandi profondità ed operare sulle falde profonde. Sono spesso integrati con raggiere di tubi drenanti.

Le opere di sostegno (muri, paratie), eventualmente integrate con ancoraggi, hanno efficacia solo per spessori di frana relativamente contenuti (fino ad una decina di metri o poco più). In alcuni casi (paratie) vengono disposte ad arco per assorbire sforzi maggiori di quelli operativi in regime piano di deformazione. Allo scopo di evitare pericolose risalite della falda, è essenziale che queste opere consentano il drenaggio verso valle delle acque sotterranee. Nel caso dei muri di sostegno, è essenziale che questi siano dotati di un adeguato drenaggio a tergo; nel caso di paratie, è opportuno che i pali siano adeguatamente distanziati o, almeno, che la paratia possa drenare mediante aste suborizzontali forate che le attraversino.

In alcuni casi (movimenti superficiali) è possibile intervenire con manufatti in terra rinforzata o in Terra Armata.

Nel caso di frane attive, l'azione esercitata dai terreni su tali strutture può essere calcolata mediante *back analysis* utilizzando i metodi dell'equilibrio limite. Il valore limite che tale azione può attingere è, comunque, quello della spinta passiva. Si osservi che una struttura di sostegno capace di assorbire la spinta passiva trasmessa dal terreno non è necessariamente capace di stabilizzare la frana che potrebbe comunque scavalcarla.

Delle chiodature si è già discusso nel paragrafo precedente.

Gli ancoraggi (sia attivi che passivi) vengono spesso realizzati in congiunzione con altri

interventi (muri e paratie). Altre volte possono essere realizzati da soli, trasmettendo gli sforzi al terreno tramite placcaggi, travi o piastre isolate. Questi interventi sono a volte inefficaci a causa della corrosione che attacca le barre. E' quindi necessaria l'adozione di efficaci metodi di protezione contro la corrosione.

L'efficacia degli ancoraggi può essere valutata mediante i metodi dell'equilibrio limite, considerando l'incremento di attrito dovuto alle sollecitazioni trasmesse sulla superficie di scorrimento ed eventualmente la resistenza al tranciamento delle barre.

3.9. Criteri per la progettazione degli interventi

La scelta e la progettazione degli interventi di consolidamento è subordinata alla valutazione di numerosi fattori derivanti sia dal contesto geologico-ambientale di riferimento, che alla destinazione d'uso del pendio.

Per l'ampiezza e la complessità del tema, piuttosto che di regole generali di progetto, difficilmente codificabili, nel seguito verranno fornite alcune raccomandazioni, la cui validità deriva dalle conoscenze acquisite in campo tecnico-scientifico dopo molti anni di sperimentazione su casi reali.

Le indagini e gli studi svolti nell'ambito delle attività di presidio territoriale, finalizzate all'inquadramento del fenomeno, costituiscono la fase preliminare delle indagini di dettaglio sulle quali basare la progettazione geotecnica di ogni intervento. L'accurata individuazione topografica del fenomeno, le conoscenze di base degli elementi di geologia, geomorfologia, geotecnica, etc, rappresentano, infatti, l'indispensabile punto di partenza della progettazione.

I modelli di calcolo utilizzati per le analisi di stabilità (in assenza e in presenza di interventi di consolidamento) devono essere considerati solamente come *schemi semplificati di riferimento*, da applicarsi con cautela ai fini dell'interpretazione di un fenomeno reale spesso altamente complesso.

Essi dovranno essere impostati assumendo come parametri di riferimento quei fattori che, nel singolo caso in esame, si ritengono più significativi e che sono stati posti sotto controllo con misure in sito estese ad un arco di tempo sufficientemente lungo per la raccolta dei dati significativi (ad esempio, pressioni neutre, spostamenti). Le verifiche condotte attraverso un siffatto modello risulteranno di gran lunga più significative in

quanto “*tarate*” sulla base di risultati sperimentali e consentiranno, laddove ritenuto necessario, la modifica del tipo di modello da utilizzare.

Sarà, comunque, opportuno accertare la *sensibilità* dei risultati del calcolo alle variazioni che tali parametri potranno subire nel tempo o per l’incertezza derivante da stime preliminari.

Un altro aspetto molto importante è quello legato alla *definizione del coefficiente di sicurezza FS* e alla *scelta del valore numerico* da attribuire allo stesso nella valutazione del grado di stabilità di un pendio prima ed eventualmente dopo la realizzazione di interventi di consolidamento.

Con riferimento al primo aspetto ed in particolare al caso degli scorrimenti, i vari metodi disponibili per le verifiche di stabilità definiscono il coefficiente di sicurezza in svariati modi, comunque riconducibili alle seguenti tre definizioni nelle quali si fa riferimento ad un evento di rottura lungo un’ipotetica superficie di scorrimento:

- rapporto tra le forze che si oppongono allo scivolamento (Forze Resistenti F_R) e quelle che lo favoriscono (Forze Instabilizzanti F_I): $FS = F_R / F_I$;
- rapporto tra il momento, intorno ad un punto, delle forze che si oppongono allo scivolamento ed il momento delle forze che lo favoriscono: $FS = M_R / M_I$;
- rapporto tra la resistenza al taglio disponibile ($\tau = c' + \sigma' \tan \varphi$) e la tensione tangenziale media mobilitata (τ_m): $FS = \tau / \tau_m$.

In alcuni casi (verifiche svolte in termini di tensioni efficaci), potranno essere introdotti fattori di sicurezza parziali FS_c e FS_φ con i quali si riducono localmente i parametri di resistenza al taglio misurati con le prove in sito o di laboratorio ($c'_m = c' / FS_c$; $\tan \varphi'_m = \tan \varphi' / FS_\varphi$).

Le precedenti definizioni fanno tutte riferimento a metodi deterministici per l’accertamento del grado di sicurezza; il giudizio sull’*affidabilità del progetto* dipende, dunque, in larga massima, dall’esperienza del progettista. Teoricamente la stabilità è assicurata se il coefficiente di sicurezza è superiore all’unità; i valori numerici assunti

da tale coefficiente dipendono, tuttavia, dalla definizione prescelta.

La diversità di definizioni comporta, inoltre, l'assunzione di differenti valori di esercizio per i singoli valori della resistenza al taglio, come può facilmente verificarsi mettendo a confronto, per esempio, le ultime due definizioni. Appare, infatti, evidente che FS_c e FS_ϕ coincidono solo se assumono il valore del coefficiente di sicurezza globale FS. Tale circostanza è tutt'altro che frequente soprattutto in terreni argillosi, stante la diversa dipendenza della coesione e dell'angolo di attrito dagli spostamenti: il primo dei fattori citati si mobilita, infatti, per spostamenti notevolmente inferiori a quelli necessari per mobilitare la resistenza per attrito. Ne segue che se, in dipendenza degli spostamenti avvenuti, la coesione si è interamente mobilitata ($FS_c = 1$), il coefficiente di sicurezza parziale FS_ϕ deve assumere valori alquanto superiori all'unità perché FS conservi il valore che si intende globalmente attribuire al pendio; inoltre i vari procedimenti numerici di calcolo forniscono in generale risultati alquanto diversi per il coefficiente di sicurezza.

Da quanto detto, risulta indispensabile che la valutazione del grado di stabilità di un pendio (con o senza interventi) venga effettuata *specificando* di volta in volta a quale definizione del coefficiente di sicurezza ci si riferisce ed attraverso quale procedimento di calcolo esso è stato valutato.

Per quanto riguarda la *scelta del valore numerico* da attribuire al coefficiente di sicurezza, nel caso concreto esso dipende:

- dal grado di approssimazione delle indagini;
- dall'affidabilità dei processi di elaborazione ed interpretazione dei dati raccolti;
- dalla completezza delle informazioni disponibili;
- dalle conseguenze prodotte in termini di vite umane e/o di danni economici.

Nello spirito di tutto quanto detto finora, il D.M. 11.03.1988 non fornisce alcun valore per i pendii, in quanto “*il valore del coefficiente di sicurezza sarà assunto dal progettista e giustificato sulla base delle considerazioni relative al livello di conoscenza raggiunto ed al grado di affidabilità dei dati disponibili, alla complessità della*

situazione geologica e geotecnica”. Può, comunque, essere utile segnalare che nel citato decreto viene richiesto un coefficiente di sicurezza non inferiore a 1.3 per i fronti di scavo e per la stabilità globale di un muro di sostegno, da valutare con metodi analoghi a quelli utilizzati per la verifica di stabilità dei pendii. Inoltre, altre normative, come quelle relative alla progettazione di sbarramenti idraulici in terra consentono l’adozione di un coefficiente di sicurezza pari ad 1.2 in presenza di azioni sismiche.

Tenuto conto che le situazioni alle quali il D.M. fa riferimento sono caratterizzate dalla conoscenza di una serie di elementi (condizioni al contorno, geometria e proprietà meccaniche dei materiali), nel caso di pendii naturali, per i quali l’incertezza relativa a tali elementi è in genere molto maggiore, pur in assenza di indicazioni cogenti, appare naturale imporre coefficienti di sicurezza non inferiori a quelli proposti per i pendii artificiali. Solo in situazioni particolari per le quali esistano i presupposti per una progettazione spinta e, contemporaneamente, non siano previste conseguenze catastrofiche sulla vita umana, sulle strutture e sulle infrastrutture e sulle attività economiche, il progettista potrà valutare se adottare coefficienti di sicurezza minori.

A questo proposito, si rileva che normative adottate da altri Paesi (ad. es. Hong Kong) sono più articolate e forniscono valori differenziati in funzione di varie combinazioni di rischio, comunque sempre in presenza di un’area di limitata estensione nella quale il livello di conoscenze geologiche e geotecniche è molto elevato.

3.10. Ulteriori considerazioni

E’ possibile che, anche dopo che siano state portate a termine tutte le azioni di cui ai punti precedenti, si stimi che in alcune aree permanga un rischio residuo.

In tali contesti sarà necessario proseguire il monitoraggio ed eventualmente il presidio territoriale per approfondire le conoscenze ed avviare eventualmente una procedura di continua manutenzione e/o consolidamento finalizzata alla progressiva mitigazione del rischio residuo secondo un procedimento di tipo essenzialmente osservazionale.

Fino a che il rischio non sia stato significativamente ridotto, potranno essere installati o mantenuti sistemi di allerta e di allarme, i cui parametri di controllo potranno essere eventualmente modificati in funzione dell’incremento delle conoscenze derivante dal monitoraggio stesso.