



C.U.G.R.I.



CONSORZIO INTER - UNIVERSITARIO
per la Previsione e Prevenzione dei Gradi Rischi
Università di Salerno – Università di Napoli “Federico II”

Autorità di Bacino Regionale Destra Sele

PIANO STRAORDINARIO PER LA RIMOZIONE DELLE SITUAZIONI A RISCHIO PIÙ ALTO

contenente

**“L’INDIVIDUAZIONE E LA PERIMETRAZIONE DELLE AREE A RISCHIO IDROGEOLOGICO
MOLTO ELEVATO PER L’INCOLUMITÀ DELLE PERSONE E PER LA SICUREZZA DELLE
INFRASTRUTTURE E DEL PATRIMONIO AMBIENTALE E CULTURALE”**

D.L. 11/06/98, n°180 convertito in legge 03/08/98, n°267

D.P.C.M. 29/09/98,

D.L. 13/05/99, n°132 convertito in legge 13/07/99, n°226

Rischio di Frana

**PIANO RELATIVO ALLA FASE DI PROGRAMMAZIONE PER LA
MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI FRANA**

Il Direttore del C.U.G.R.I.
Prof. Ing. Leonardo Cascini

INDICE

1. Azioni da intraprendere	1
2. Sopralluoghi e Presidio Territoriale	4
2.1 Sopralluoghi	4
2.2 Presidio Territoriale	5
3. Manutenzione	7
4. Indagini	12
5. Monitoraggio Strumentale	20
6. Interventi di consolidamento	25
6.1 Criteri di progettazione	25
6.2 Criteri di intervento	28

PIANO RELATIVO ALLA FASE DI PROGRAMMAZIONE PER LA MITIGAZIONE DEL RISCHIO DI FRANA

1. Azioni da intraprendere

Per la mitigazione del rischio idrogeologico sono necessarie le azioni immediate, *a breve, medio e lungo termine*, riassunte in tab. 1 e qui di seguito elencate:

AZIONI IMMEDIATE (nei primi 6 mesi)

- a) Informazioni agli Enti
- b) Rilievo speditivo per la valutazione dello stato del patrimonio abitativo e della popolazione residente nell'area
- c) Sopralluoghi per la individuazione della sussistenza di pericolo incombente per la pubblica e privata incolumità, infrastrutture e patrimonio ambientale e culturale
- d) Valutazione sulla necessità di avvio del presidio territoriale
- e) Individuazione delle attività di manutenzione
- f) Azioni di protezione civile di cui all'art. 1 comma 4 D.L. 180/98

AZIONI A BREVE TERMINE (dai 6 ai 12 mesi)

- a) Inizio delle attività di manutenzione straordinaria e delle azioni più urgenti per la riduzione, laddove possibile, del pericolo incombente
- b) Avvio presidio territoriale;
- c) Progettazione del monitoraggio per il controllo strumentale delle situazioni critiche e delle indagini propedeutiche di consolidamento;

AZIONI A MEDIO TERMINE (dai 12 ai 24 mesi)

- a) Esecuzione;
- b) Installazione del monitoraggio strumentale;
- c) Rimozione delle ulteriori situazioni di pericolo incombente messe in luce dal presidio territoriale

PROGETTAZIONE AZIONI A LUNGO TERMINE (dai 24 mesi)

- a) Interventi di consolidamento
- b) Prosecuzione del monitoraggio nelle aree in cui si ritiene indispensabile il controllo strumentale

Le attività elencate possono essere svolte in parte o in toto, a seguito delle risultanze che scaturiscono dalla concertazione tra tutti gli Enti competenti. Inoltre devono, in ogni caso, ed in assenza di motivate ragioni, seguire il percorso logico delineato che si pone il fine di una reale mitigazione del rischio di frana attraverso una razionale e sempre più approfondita conoscenza del territorio.

A tale scopo, nei primi sei mesi, si procederà all’informazione degli Enti che dovranno obbligatoriamente fornire tutti gli elementi utili ai fini della riduzione, o dell’estensione delle aree a rischio molto elevato.

Sempre a seguito di concertazione tra gli Enti, nello stesso arco di tempo si dovrà dare inizio a: indagini e studi nelle aree definite critiche al fine di contenere al minimo la perimetrazione delle aree a rischio molto elevato; attività finalizzate all’individuazione delle situazioni più evidenti di pericolo imminente e delle opere che richiedono urgenti interventi di manutenzione; svolgimento delle azioni di protezione civile di cui all’Art. 1, comma 4 del D.L. 180/98.

Nei successivi sei mesi si inizieranno gli interventi di manutenzione e di rimozione del pericolo imminente, laddove non si sia già provveduto; si darà, altresì, inizio al presidio territoriale la cui funzione è ritenuta indispensabile per il controllo del territorio e, nel contempo, propedeutica alle indagini ed al monitoraggio strumentale delle aree a rischio molto elevato.

In assenza di motivate ragioni che ne consentano l’avvio in tempi più rapidi, le indagini ed il monitoraggio si eseguiranno nel corso del successivo anno, unitamente ad altre opere per la rimozione di situazioni di pericolo imminente e di manutenzione, evidenziate dall’attività conoscitiva in precedenza svolta.

Una volta in possesso degli indispensabili elementi di valutazione si potrà procedere alla progettazione degli interventi strutturali e non strutturali, in assenza dei quali il controllo del territorio e la gestione delle eventuali fasi emergenziali, è affidata agli Organi competenti, in base alle leggi vigenti, che si avvarranno del quadro conoscitivo fornito dal presidio territoriale.

Tralasciando la concertazione tra gli Enti e gli argomenti che non necessitano di approfondimento, nel seguito si forniscono gli indispensabili elementi di valutazione sulle principali attività da porre in essere per la mitigazione del rischio.

2. Sopralluoghi e Presidio Territoriale

2.1 Sopralluoghi

I sopralluoghi rappresentano un'azione preliminare da svolgere mediante osservazione diretta, fotografie, filmati ed eventualmente rilievi sporadici di tipo semiquantitativo. Essi sono finalizzati alla individuazione, all'interno delle zone a rischio molto elevato, della sussistenza di pericolo imminente per la pubblica e privata incolumità, per le infrastrutture ed il patrimonio ambientale e culturale.

I sopralluoghi devono essere svolti da una *équipe* che comprenda almeno un geologo ed un ingegnere.

Le osservazioni comprenderanno:

- rilievi di tipo geologico, strutturale e geomorfologico con particolare riferimento a: natura dei terreni, orientazione dei principali sistemi di discontinuità negli ammassi rocciosi ed apertura e grado di riempimento delle discontinuità stesse, venute idriche superficiali o ristagni d'acqua, tipologia del movimento franoso ed eventuali elementi indicativi della sua storia, avvallamenti, fratture e trincee, ondulazioni ovvero rigonfiamenti del terreno, fenomeni di erosione concentrata o accelerata ecc.;
- osservazioni sulla natura della vegetazione ed eventuali correlazioni con il regime delle acque superficiali e profonde;
- sporadiche misure di distanze (tra elementi morfologici significativi, tra discontinuità negli ammassi rocciosi ovvero della lunghezza o della larghezza del presunto movimento franoso ecc.), di angoli (inclinazione e azimuth di discontinuità) o di spostamenti del terreno;
- rilievi sulla natura e lo stato di conservazione di strutture ed infrastrutture presenti sul territorio, oltre che del relativo quadro fessurativo e delle eventuali condizioni di danneggiamento (perdita di verticalità di edifici, perdite idriche da tubazioni o da canali ecc.).

Se possibile, i rilievi verranno effettuati mediante semplici strumenti di misura di distanze, di angoli o di verticalità e, nel caso di più sopralluoghi, sarà opportuno ripeterli nel tempo eventualmente installando strumenti, come fessurimetri, assi in legno da disporre a cavallo di fratture riconosciute nel terreno ecc., di modesto impegno.

I sopralluoghi 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. Infatti, nel caso di sopralluoghi effettuati in tempi successivi, un accurato confronto dei dati raccolti nei vari sopralluoghi può consentire una preliminare ricostruzione della evoluzione del versante.

Una copia dei verbali sarà conservata dall’Autorità di Bacino competente che provvederà ad elaborarle e ad archivarle su supporto informatico.

2.2 *Presidio Territoriale*

Il presidio territoriale, già sperimentato con successo nelle aree della Regione Campania interessate dai fenomeni franosi del Maggio 1998, ha la funzione di rilievo in continuo delle modifiche di carattere geomorfologico e dei conseguenti fenomeni che interessano le strutture e le infrastrutture presenti nelle zone a rischio elevato. In sostanza, esso viene svolto con le medesime procedure con le quali sono effettuati i sopralluoghi, ma è di fatto continuo nel tempo e nello spazio. Nell’ambito del presidio vanno, pertanto, raccolti tutti quegli elementi di base di tipo geologico, morfologico, idrogeologico ed urbanistico che concorrono alla conoscenza del territorio.

Quando ritenuto necessario, il presidio può, inoltre, includere tutte quelle misure strumentali descritte nei paragrafi che seguono, che consentono di integrare i rilievi qualitativi e semiquantitativi oggetto dei sopralluoghi.

La struttura di presidio territoriale viene individuata di concerto tra la Protezione Civile e l’Autorità di Bacino, previa stipula di un’intesa di programma.

La struttura organizzativa prevede un gruppo di coordinamento tecnico ed amministrativo ed un gruppo di tecnici addetti ai rilievi.

I profili professionali, sia per il gruppo di coordinamento tecnico-scientifico, così come per il gruppo di tecnici addetti ai rilievi, sono individuati essenzialmente in quelli del geologo e dell’ingegnere civile o dell’ingegnere per l’ambiente ed il territorio.

Le attività del presidio vengono pianificate dal gruppo di coordinamento che assicura anche la validazione tecnica e scientifica dei risultati conseguenti ai rilievi.

I rilievi effettuati nel corso del presidio territoriale concorrono alla definizione del programma di monitoraggio finalizzato alla manutenzione e/o al consolidamento delle zone instabili ed alla gestione, nel modo migliore, di quegli interventi di manutenzione

che, da soli, possono in molti casi 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 di allarme, compito fondamentale del presidio è anche quello di monitorare l'evoluzione della situazione in rapporto ai valori indicati dalle soglie.

In linea di principio, i prodotti dell'attività di presidio sono costituiti da:

- una carta geologica e strutturale;
- una carta delle coperture di tipo detritico e residuale;
- una carta geomorfologica di dettaglio;
- una carta inventario dei fenomeni franosi;
- una carta idrogeologica di dettaglio;
- una scheda con indicazione, per ogni fenomeno franoso (che deve essere univocamente individuato mediante una sigla distintiva), della natura dei terreni interessati e dei parametri morfologici più significativi.
- una scheda del tipo di strutture ed infrastrutture presenti nell'area in frana e del relativo stato di conservazione;
- una carta degli insediamenti e delle infrastrutture;
- una carta degli elementi rivelatori di fenomeni franosi incipienti o in atto; una volta identificati, questi saranno individuati con una sigla, saranno fotografati e segnalati a terra mediante picchetto o cartello con l'indicazione della sigla corrispondente;
- diagrammi temporali dei principali parametri indicativi dei fenomeni franosi incipienti o in atto (apertura di fessure, inclinazione di manufatti, distanze tra oggetti mobili ed oggetti immobili ecc.);
- diagrammi temporali e qualsiasi altra elaborazione utile ottenuta mediante strumentazione *ad hoc* (v. paragrafo successivo).

I prodotti dell'attività di presidio, così come i verbali di sopralluogo, saranno consegnati alla competente Autorità di Bacino ed archiviati su supporto informatico.

L'attività del presidio territoriale va, inoltre, fornita agli organi competenti che ne traggono le indicazioni necessarie per la gestione del rischio e l'eventuale attivazione, quando esistenti, di soglie di allerta o di allarme.

3. Manutenzione

In questa sede si definisce manutenzione l'insieme di tutte quelle attività che hanno la funzione di ridurre la probabilità di frane di piccole dimensioni e di mitigare gli effetti di fenomeni di più rilevante estensione.

La manutenzione si esplica attraverso una serie di interventi limitati e può essere riferita sia al territorio che alle opere su di esso esistenti. Nel primo caso, ogni qualvolta possibile ed a seguito di valutazioni accurate è consentito il ricorso alle tecniche di ingegneria naturalistica descritte nelle linee guida del Ministero dell'Ambiente. Nel secondo caso, essa ha la funzione di limitare la naturale degradazione fisica e di efficienza delle opere realizzate.

Le opere di manutenzione devono essere oggetto di appositi progetti che possono essere basati anche esclusivamente sui risultati derivanti dall'attività del presidio territoriale, che anche da questo punto di vista svolge una funzione fondamentale.

La tipologia delle opere dipende fortemente dalla natura dei terreni interessati e dalle caratteristiche geomorfologiche e di accessibilità dei luoghi, dalle caratteristiche e dalle presunte cause dei movimenti franosi, dalle condizioni meteorologiche in atto e previste, dal tipo di strutture ed infrastrutture presenti sul territorio. Non è, quindi, possibile fare una casistica, se non sulla base di esempi relativi alle situazioni più diffuse.

Nel caso dei costoni rocciosi, la manutenzione assume un'importanza considerevole, tenuto conto del fatto che qualsiasi opera di consolidamento non può essere effettuata durante l'evento franoso, data la sua elevata velocità.

A questo fine, il presidio territoriale può concorrere all'individuazione delle situazioni che richiedono interventi mirati attraverso la segnalazione delle zone nelle quali si può verificare di frequente il distacco di volumi di limitata estensione, delle reti paramassi riempite di materiale detritico etc.

Le attività manutentorie finalizzate a ridurre la probabilità dell'evento franoso di dimensioni contenute sono dirette: alla rimozione delle specifiche cause di innesco dei micromovimenti che spesso precedono la rottura (azione di radici nelle fratture, azione del ghiaccio o della pressione dell'acqua nelle fratture, *cleft pressure*, erosione alla base di blocchi rocciosi) ed alla restituzione di efficienza alle opere di consolidamento.

Pertanto, esse potranno consistere: nella rimozione di volumi completamente o parzialmente sradicati e nella estirpazione di radici capaci di produrre la progressiva apertura di giunti, fratture ecc.; nella regimazione delle acque superficiali per la eliminazione, o per lo meno la riduzione, di significativi afflussi idrici in zone a stabilità precaria, dove l'infiltrazione in giunti aperti e non persistenti potrebbe produrre accumuli idrici con incremento della spinta ed eventualmente, in periodi freddi, la formazione di ghiaccio; nella realizzazione di opere atte a ridurre l'erosione al piede di blocchi di roccia instabile, i cui movimenti potrebbero comportare effetti a catena (è tipico il caso dei ribaltamenti); nella pulizia di reti paramassi ostruite dall'accumulo di detriti; nella riabilitazione delle opere di consolidamento soggette a fenomeni di corrosione, mediante sostituzione di parti o integrazione del sistema con elementi aggiuntivi; nella riabilitazione di opere strutturali lesionate, mediante rinforzi ecc.

Al fine di un'ottimale utilizzazione delle risorse economiche potrà essere opportuno svolgere, durante l'esecuzione delle opere di manutenzione, tutti quei rilievi in parete che sono spesso resi impraticabili dall'inaccessibilità dei luoghi e che risultano di fondamentale importanza nella progettazione dei più impegnativi interventi di consolidamento.

Anche in zone soggette al rischio di colate in materiale incoerente, piroclastico, di colmata o di discarica, la manutenzione è fondamentale, considerando che anche in questo caso non è possibile intervenire nel corso dei movimenti.

Il controllo del regime delle acque superficiali anche attraverso eventuali misure delle portate, il controllo dell'apertura di fratture nel terreno, della suzione negli strati più superficiali e delle pressioni neutre in profondità, sono tutti elementi forniti dal presidio territoriale ed utili per valutare l'evoluzione delle condizioni di stabilità dei versanti suscettibili a fenomeni di colata.

Allo stesso tempo, è necessario il controllo: della efficienza dei manufatti destinati alla riduzione dell'erosione, della capacità idrica e della integrità di tutte le opere idrauliche per la regimazione delle acque superficiali (cunette, canali, briglie, trincee drenanti), della integrità delle opere di rinforzo e di sostegno (opere di tipo forestale, muri, paratie ecc.) e della funzionalità delle opere destinate alla protezione degli insediamenti (barriere di vario tipo, vasche di laminazione e di accumulo ecc.).

Le cause di innesco possono essere sia esterne (piogge particolarmente intense e prolungate, azioni sismiche, azioni antropiche, erosione concentrata), che interne (collassi localizzati prodotti da cause qualsiasi, capaci di produrre effetti a catena).

Pertanto, la manutenzione del territorio sarà finalizzata ad eliminare o ridurre gli effetti di almeno alcune di queste cause. Tra gli interventi possibili si possono citare: la regimazione delle acque superficiali, finalizzata soprattutto ad evitare afflussi concentrati con elevata portata, capaci di produrre fenomeni molto rapidi di erosione e scoscendimenti con effetti non sempre controllabili; la messa in opera o l'integrazione, su modesta scala, di specie arbustive capaci, da un lato, di ridurre l'infiltrazione superficiale, dall'altro, di consolidare col proprio apparato radicale gli strati più superficiali; la rimodellazione dei versanti, con la finalità di eliminare afflussi idrici concentrati in zone scarsamente drenanti ovvero ristagni d'acqua ecc.; la pulizia di impluvi soggetti a riempimento di detrito sciolto instabile ovvero collassabile.

La manutenzione dei manufatti includerà non solo quella delle eventuali opere di consolidamento e protezione già esistenti, ma anche quella di infrastrutture (strade, muri ecc.), con diversa funzione, presenti sui versanti e dotate di inadatte o inefficienti opere idrauliche di convogliamento e scarico delle acque superficiali (ad esempio, è importante la pulizia continua di cunette, canali di gronda, la cui ostruzione, anche con terreno, comporta il riversamento di portate d'acqua all'esterno, con possibilità di infiltrazioni in profondità), ovvero di manufatti utilizzati per il trasporto di acqua (tubazioni, canali a sezione chiusa), le cui perdite idriche, dovute ad esempio a fessurazioni, potrebbero aggravare le condizioni di stabilità dei versanti.

La manutenzione delle opere potrà includere la ricostituzione di interventi di tipo forestale (vimate vive ed opere analoghe), la ricostituzione di trincee drenanti, la pulizia di impluvi nella parte che insiste su briglie ed opere analoghe e l'eventuale riabilitazione di queste ultime, la pulizia di vasche di accumulo e di laminazione, la riabilitazione di muri e barriere ecc.

Nel caso di frane in materiali argillosi e flyscioidi, la velocità attesa dei movimenti è minore che nei casi precedenti. Questo comporta che spesso (fino a che la velocità si mantenga dell'ordine dei m/g) le attività di manutenzione, o almeno alcune di esse, non devono più essere necessariamente di prevenzione e possono essere svolte anche dopo l'innesco dei movimenti.

Il presidio territoriale può consentire di valutare, innanzi tutto, i sintomi preparatori del vero e proprio collasso, ma anche (questo nel caso di movimenti molto lenti) i segni rivelatori dei fenomeni in atto.

Nell'uno e nell'altro caso, e con riferimento agli scorrimenti ed alle colate in argilla, che a volte producono condizioni di rischio elevato, essi possono essere individuati essenzialmente dalla 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, dalla formazione di zone con ristagno d'acqua per difficoltà di drenaggio superficiale in qualsiasi zona dell'area in frana, da improvvise venute d'acqua, dalle inclinazioni degli alberi e di manufatti, da lesioni nelle strutture e così via.

Le cause principali di innesco di fenomeni franosi in depositi argillosi sono quelle naturali (azioni sismiche, piogge ed erosione) e le azioni antropiche.

Anche in questi casi, la manutenzione del territorio può esplicarsi essenzialmente attraverso la regimazione delle acque superficiali, specie in zone a difficile drenaggio naturale, ed il controllo dell'erosione.

La continua sigillatura di fratture aperte con materiale impermeabile ovvero la realizzazione di piccole cunette in opportuna posizione, possono contribuire a ridurre l'infiltrazione superficiale. Inoltre, piccoli movimenti di terra destinati alla rimozione di materiale instabile, al consolidamento, mediante la costruzione di berme, del piede di scoscendimenti, ovvero al miglioramento dei deflussi superficiali, possono produrre effetti benefici, fino alla stabilizzazione del pendio quando i fenomeni di instabilità sono di modeste dimensioni.

Nel caso di frane in materiali argillosi o flyscioidi, la manutenzione del territorio non è sempre così efficace come nei casi precedenti, mentre è essenziale quella diretta principalmente al ripristino delle opere di stabilizzazione eventualmente già esistenti.

Nel caso di opere idrauliche finalizzate a ridurre l'afflusso di portate idriche nelle aree instabili mediante la costruzione di canali di gronda, trincee drenanti ecc., la manutenzione ha una funzione spesso fondamentale, in quanto l'entità di tali portate può essere notevole, tenuto conto della dimensioni dei bacini che in molti casi insistono sulle aree in frana: la manutenzione si esplicherà attraverso la pulizia dei canali, il

ripristino e l'integrazione (se di quantità modeste) di trincee ed aste drenanti, la riabilitazione dei manufatti lesionati (canali a sezione chiusa, pozzi e gallerie drenanti).

Altrettanto importante è il ripristino e la riabilitazione di tutte quelle opere che sono destinate al controllo dell'erosione (ad es. gabbionate spondali e briglie).

La manutenzione riguarda, infine, tutte le opere strutturali presenti sul territorio (muri e paratie, pozzi, ancoraggi, opere in terra rinforzata ecc.) che possono essere oggetto di deformazioni, lesioni, perdita di efficienza. Come già discusso in precedenza, essa consisterà nella riabilitazione dei manufatti caratterizzati da modeste perdite di efficienza. Nel caso di danni più gravi, sarà evidentemente necessario intervenire con ulteriori opere di consolidamento ad integrazione od in sostituzione delle precedenti.

4. Indagini

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

Il programma delle indagini deve essere definito in un progetto redatto da un tecnico competente.

I rilievi topografici consentono una esatta rappresentazione del territorio e possono essere di ausilio per la individuazione di elementi geomorfologici utili per la ricostruzione delle caratteristiche dei movimenti franosi avvenuti nel passato e di quelli in atto. Essa ha, quindi, anche una funzione di supporto per le indagini di carattere geologico e geomorfologico.

La rappresentazione topografica del territorio deve essere eseguita sulla base di foto aeree, rilievi a terra ed eventualmente (nel caso di costoni rocciosi, sempre) 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 base cartografica di dettaglio non sia strettamente limitata a queste, ma sia estesa a superfici con dimensioni dei lati almeno doppie rispetto a quelle della frana. Infatti, è possibile che movimenti anche impercettibili interessino superfici più ampie di quelle considerate in movimento; inoltre, non può essere escluso 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 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.

I rilievi topografici possono, altresì, essere utilmente impiegati per misure di controllo dei cinematismi di movimenti franosi in atto cui competono velocità limitate (max cm/g).

I rilievi geologici, geomorfologici e idrogeologici devono essere effettuati in campagne appositamente programmate.

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 di tipo detritico e residuale;
- una carta geomorfologica di dettaglio;
- una carta idrogeologica di dettaglio;
- una carta morfologica e delle frane;
- una carta delle frane.

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

La carta geolitologica e strutturale e la carta delle coperture vanno elaborate essenzialmente sulla base di rilievi di campagna e di dati storici raccolti nel corso di indagini precedenti. Tali carte possono essere integrate e migliorate con i dati raccolti nel corso delle indagini geotecniche.

Le carte geomorfologica e morfologica e delle frane devono essere elaborate essenzialmente sulla base di rilievi di campagna e di foto aeree. Anche in questo caso è utile disporre di dati raccolti in precedenti indagini.

Le foto aeree vanno confrontate con analoghe foto effettuate in epoche precedenti, se esistenti, sia per la verifica dei dati raccolti nella campagna attuale, che per la valutazione della evoluzione dei fenomeni di frana avvenuti nel passato.

Le indagini geotecniche hanno lo scopo di definire un modello di sottosuolo da utilizzare per tutte le calcolazioni 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 deve includere una caratterizzazione geotecnica del sottosuolo e del regime delle acque sotterranee, una caratterizzazione fisico-meccanica dei principali litotipi presenti e dei sistemi di discontinuità, ed infine, ove possibile, una stima dello stato tensionale iniziale.

In molti casi può essere opportuno sviluppare la campagna di indagini geotecniche in più fasi. Per esempio:

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 che possa essere appunto utilizzata come valida guida per il progetto delle stesse indagini geotecniche.
2. Un fase *di approfondimento*, che è possibile realizzare solo quando lo studio complessivo comincia a fornire un quadro d'insieme coerente, orientata all'individuazione di 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. Poiché, come è noto, i pendii sono soggetti a variazioni cicliche degli stati tensionali seguite a volte da riattivazioni dei movimenti dovute 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.

La definizione della struttura del sottosuolo deve essere effettuata in base ad una campagna di sondaggi, ed eventualmente pozzi, trincee, o addirittura gallerie esplorative, integrata da osservazioni di carattere geologico che consentano di inquadrare i dati geotecnici nel modello geologico esistente.

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 studio. Nel caso di aree in frana, non si deve trascurare di ubicare alcuni sondaggi al di fuori della superficie instabile. In prossimità dei presunti bordi di frane tipo scorrimento o colata, l'esecuzione di trincee esplorative ubicate in prossimità dei bordi e con asse normale ad essi può consentire di verificare l'effettiva esistenza di una superficie di taglio laterale e determinare la dimensione trasversale della frana.

La lunghezza dei sondaggi 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 presentano omogenei con la profondità. Se ad una certa profondità viene rinvenuta una formazione certamente stabile, i sondaggi vanno spinti per almeno 5-10 m all'interno di quest'ultima.

Con l'eccezione delle perforazioni finalizzate alla installazione di strumenti nel terreno, i sondaggi vanno eseguiti a carotaggio continuo, limitando al massimo l'uso di acqua di perforazione. L'esame accurato delle carote (che dovrà essere effettuato da un geologo o anche da un ingegnere geotecnico dotato di notevole esperienza) può, infatti, consentire di ricostruire con accuratezza il dettaglio geologico-strutturale del sottosuolo, inclusa la presenza di paleosuoli, di superfici di taglio e di zone ammorbidite che può essere indicativo della presenza di un antico corpo di frana.

In terreni coesivi, è sempre opportuna la determinazione della consistenza mediante prove semplici (ad es. mediante penetrometro tascabile). Anche questa indicazione, oltre ad essere utile per inquadrare il comportamento del terreno, può essere indicativa di anomalie dovute a movimenti progressivi.

La rappresentazione grafica dei sondaggi eseguiti su allineamenti disposti lungo le linee di massima pendenza consentirà di definire con chiarezza la struttura del deposito secondo sezioni significative ai fini dei calcoli geotecnici di stabilità. Tali informazioni potranno essere integrate con quelle derivate da indagini di tipo geofisico.

I primi risultati delle indagini possono guidare verso una progressiva 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 è, spesso, essenziale per l'esecuzione di una razionale campagna.

Nel caso di ammassi rocciosi, l'indagine finalizzata all'accertamento della struttura del sottosuolo deve considerare la descrizione dei sistemi di discontinuità attraverso la misura della loro orientazione spaziale, della spaziatura, della persistenza, della rugosità, dell'apertura e della natura dell'eventuale materiale di riempimento.

Tali misure verranno effettuate su fronti di scavo che consentano il rilievo delle discontinuità su due piani mutuamente ortogonali ovvero, quando possibile, in galleria. In assenza di questo tipo di dati, sarà necessario effettuare almeno rilievi sulle carote dello stato di fratturazione.

In molti casi è necessario determinare lo spessore di corpi di frana quiescenti o attivi. A tal fine, è fondamentale un attento esame delle carote estratte dal sottosuolo, in quanto, per effetto delle deformazioni indotte dai movimenti e dal conseguente assorbimento di acqua, il corpo di frana in genere presenta colore (tipico delle formazioni alterate, con presenza di zone ossidate), litologia (presenza di paleosuoli, di zone ammorbidite, di contenuto organico, di frammenti lapidei, ecc.), e caratteri strutturali (stato di fessurazione e presenza di zone di taglio) molto differenti dalla formazione di base. Per questo motivo, come si è detto, è opportuno che la campionatura sia continua.

Specie quando si presume che il corpo di frana presenti rigidità molto inferiore a quella della formazione stabile sottostante (per esempio nel caso di colate in terreni argillitici, caratterizzate, come è noto, da un forte decadimento della rigidità nel corso dei movimenti), potrà essere utile ricorrere ad indagini geofisiche di tipo sismico capaci di fornire, per via indiretta, la rigidità dei terreni attraversati. In alternativa, quando possibile (per esempio nel caso di terreni argillosi omogenei mediamente consistenti), si potrà fare ricorso a prove penetrometriche di tipo statico (CPT).

Infine, nel caso di frane attive, può risultare molto utile l'uso di tubi spia ovvero il ricorso a misure inclinometriche (v. paragrafo successivo) che forniscono una precisa indicazione della profondità della superficie di scorrimento.

Il regime delle acque sotterranee andrà investigato mediante l'installazione di piezometri e tensiometri. Poiché nei pendii in generale l'acqua è in movimento, e pertanto le quote piezometriche variano da punto a punto e, in particolare, con la profondità, è d'obbligo l'esecuzione di misure puntuali mediante piezometri dotati di 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.

Evidentemente, il numero di piezometri deve essere tale da consentire di ricostruire il regime di flusso sulla base di dati puntuali. Spesso è buona norma disporre più piezometri lungo la stessa verticale.

La scelta del tipo di piezometri è funzione della natura dei terreni interessati e dei valori attesi delle altezze piezometriche: ad esempio, al di sopra del pelo libero della

falda idrica e, in particolare, in terreni parzialmente saturi, è necessario installare piezometri o tensiometri capaci di misurare altezze piezometriche negative.

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

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).

Quando possibile, è opportuno effettuare il campionamento da pozzi o da trincee, che consentono di operare nelle migliori condizioni e, soprattutto, di campionare nei punti più adeguati.

Le prove in sito includono tra l'altro prove di permeabilità, prove penetrometriche statiche (CPT) o dinamiche (SPT), prove scissometriche, prove di taglio diretto, prove di carico su piastra, prove pressiometriche ecc., la cui tipologia va scelta in funzione della natura dei terreni interessati.

Tipicamente, le prove di permeabilità vengono effettuate in piezometri. Le prove possono essere eseguite sia a carico idraulico costante che a carico idraulico variabile.

Le prove penetrometriche e le prove scissometriche spesso non sono eseguibili per la elevata consistenza dei terreni e per la presenza di elementi lapidei. Quando la natura del materiale lo consente, le prove penetrometriche statiche consentono di acquisire in continuo dati sulle proprietà dei terreni e sul dettaglio geotecnico (indicando, ad esempio, la presenza e l'ubicazione di zone deboli).

Le prove di taglio diretto consentono di caratterizzare giunti in roccia od in formazioni fliscioidi. La loro esecuzione è molto impegnativa e costosa.

Le prove pressiometriche vengono eseguite raramente per il loro costo e la difficoltà di interpretazione dei dati. Comunque, per la difficoltà di campionamento e la scarsa penetrabilità dei terreni mediante prove CPT o SPT, esse sono a volte le uniche prove effettivamente realizzabili.

La prove di carico su piastra sono utilizzate molto di rado; nei terreni coesivi fessurati consentono, tuttavia, di valutare la coesione non drenata con maggiore grado di attendibilità che in laboratorio.

Le prove meccaniche di laboratorio vanno eseguite su campioni indisturbati (classe Q5). 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 all'interno dei quali 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, in permeometro, edometro o cella triassiale, prove di compressione edometrica, isotropa od anisotropa, prove di compressione triassiale eventualmente a percorso di sollecitazione controllato, prove di taglio diretto o anulare.

Le condizioni di drenaggio vanno scelte in funzione del tipo di problema da affrontare e di considerazioni di natura squisitamente sperimentale.

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 minimo pari a 68-85 mm.

Nel caso di terreni parzialmente saturi (ad esempio i terreni piroclastici), la sperimentazione deve essere effettuata nelle reali condizioni di suzione esistenti in sito. E' anche opportuno valutare gli effetti delle variazioni di suzione sulla resistenza al taglio.

In molti casi, risulta di fondamentale importanza la determinazione della resistenza critica (nel caso di argille sovraconsolidate soggette a rottura progressiva) e/o della resistenza residua (nel caso di frane attive o riattivate). Pur essendo queste grandezze teoricamente indipendenti dai parametri di stato (e quindi misurabili su provini ricostituiti in laboratorio), è opportuno determinarle 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. A tal fine, in linea di principio potrebbero

essere utilizzate tecniche di fratturazione idraulica, misure mediante pressiometro autoperforante o misure con cella di carico.

Le indagini geotecniche devono essere eseguite da ditte dotate di adatti requisiti e solo sulla base di un progetto firmato da un ingegnere di comprovata esperienza.

I risultati delle indagini geotecniche devono essere compendati in una apposita relazione geotecnica.

5. Monitoraggio Strumentale

Il monitoraggio delle zone a rischio rappresenta uno strumento fondamentale di conoscenza dell'evoluzione geomorfologica del territorio da utilizzare 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, 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 capaci di produrre instabilità che i corrispondenti comportamenti dei versanti.

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

L'adozione di sistemi di allerta o di allarme (finalità b) viene effettuata 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 sulla misura 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 ritiene ne controllino l'evoluzione.

L'allerta è indicativa di uno scenario di aggravamento possibile 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 salvaguardia.

Il monitoraggio, unitamente alle attività di presidio territoriale, contribuisce, infine, alla raccolta degli elementi necessari per la progettazione degli interventi di consolidamento dei pendii instabili (finalità c). Ulteriori dati verranno raccolti in specifiche indagini *ad hoc*.

Il monitoraggio riguarda tutte le grandezze fisiche che consentano di ricostruire ovvero di controllare 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;
- 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;

Le condizioni ambientali, sisma e pioggia, sono considerate il principale fattore di innesco dei movimenti franosi.

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

Nel secondo il monitoraggio si presenta di maggiore utilità, certamente nell'uso di modelli previsionali “a scatola chiusa”, oppure nell'utilizzazione dei cosiddetti modelli completi di versante capaci di mettere in relazione piogge, pressioni neutre e spostamenti. In molti casi 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.

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 dovuti ad esempio a macchine in movimento; ecc.

La misura di portate d'acqua 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.

Venute di acqua possono essere un segno di instabilità ovvero indicare la perdita da serbatoi, condotte, canali ecc.

La determinazione della qualità dell'acqua può aiutare a ricostruirne il percorso sotterraneo.

La misura degli spostamenti del piano di campagna risponde al problema di valutare se un pendio sia stabile o no, caratterizzare la cinematica superficiale di eventuali movimenti franosi, definire la possibilità concreta di interventi manutentivi o di consolidamento o addirittura prevedere il momento del collasso.

Nel caso di movimenti lenti, una opportuna rete di misure consente di delimitare in pianta l'area in frana. Pertanto, le misure vengono effettuate anche all'esterno della presunta area in frana.

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 le tre componenti spaziali 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 estensimetri, 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.

Anche il monitoraggio strumentale richiede un apposito progetto che precisi e giustifichi tipo, numero e *lay out* degli strumenti, oltre che la frequenza e le modalità delle misure.

Tale progetto verrà redatto da un ingegnere di documentata esperienza nel campo e dovrà essere approvato dagli organi competenti. Una volta approvato il progetto, il

programma di monitoraggio strumentale potrà essere affidato solo a ditte di comprovata esperienza nel settore.

La scelta del tipo di sensori dipenderà 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 sarà di norma quella sufficiente a raccogliere i dati necessari per il raggiungimento delle finalità del monitoraggio stesso. Nel caso queste consistano nella elaborazione di un progetto di consolidamento, sarà 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 segni premonitori dei fenomeni franosi sono deboli e di breve durata (tipicamente per i crolli in roccia e le colate in terreni incoerenti e piroclastici), è opportuno adottare sistemi in continuo con trasmissione dei dati via cavo o etere.

6. Interventi di consolidamento

6.1 Criteri di progettazione

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.

6.2 *Criteri di intervento*

Il progetto delle opere per la stabilizzazione di un pendio può comprendere una serie di provvedimenti immediati e di sistemazione definitiva. In presenza di modesti movimenti, limitati interventi di manutenzione consentono, a volte, la soluzione radicale e definitiva del problema.

In molti casi (specie in quello di movimenti lenti), l'applicazione del metodo *osservazionale* è largamente preferibile in quanto consente di pervenire ad una stabilizzazione definitiva del versante mediante un approccio flessibile ed economico che permette di sviluppare, nel tempo, il progetto di consolidamento, commisurando l'entità degli interventi agli effetti via via raggiunti. Evidentemente, tale approccio va basato su di un adeguato sistema di monitoraggio (già esistente o appositamente predisposto) che tenga sotto controllo i fattori critici da cui dipende il fenomeno, gli effetti da essi prodotti e l'efficacia delle opere di volta in volta realizzate.

Le opere di consolidamento devono essere dimensionate con una *progettazione geotecnica* redatta sulla base dei risultati di studi e indagini (v. paragrafi precedenti).

In linea di principio, un progetto di sistemazione non è affidabile se non prende le mosse dalla interpretazione del reale meccanismo che ha prodotto il dissesto. In altre parole, prima di procedere nella progettazione di un intervento di stabilizzazione, sarà necessario *individuare la causa o le cause che hanno prodotto o predispongono al dissesto* e solo su quelle si dovrà intervenire.

Interventi di consolidamento devono essere effettuati anche in quei casi in cui si valuti che il coefficiente di sicurezza del pendio è troppo basso con riferimento alla destinazione d'uso dell'area interessata (interventi preventivi).

In ogni caso sarà, comunque, necessario paragonare il coefficiente di sicurezza prima e dopo l'intervento. In tal modo potrà istituirsi una correlazione tra l'intervento

proposto (sia in termini tecnici che economici) e l’incremento di sicurezza conseguito; l’efficienza del provvedimento andrà esplorata con specifico riferimento ai fattori dai quali l’instabilità è stata causata e sui quali si intende intervenire.

Il progetto dovrà, inoltre, comprendere un *piano di misure e controlli*, commisurato all’importanza dell’intervento, delle grandezze sulle quali si è inteso intervenire e dalle quali dipende l’efficacia intervento.

Con riferimento alla tipologia degli interventi di consolidamento si osserva che sono disponibili svariati provvedimenti ognuno dei quali si fonda su un differente principio fisico. In particolare:

- negli interventi di modifica della geometria del pendio si ha una diminuzione della forza squilibrante o un aumento di quella stabilizzante di semplice e sicura calcolo.
- Il contributo delle opere di sostegno dipende dalla loro interazione col corpo di frana; nella maggioranza dei casi, con i procedimenti dell'equilibrio limite, si calcola la sollecitazione trasmessa all'opera dal terreno in modo da conseguire in quest'ultimo il prefissato aumento del coefficiente di sicurezza. La spinta sul muro o sull'insieme dei pozzi, o dei setti, o dei pali viene, poi, applicata sull'opera di sostegno, che viene dimensionata con opportuni margini di sicurezza.
- I drenaggi producono una riduzione delle pressioni neutre in modo da ottenere il prefissato aumento del margine di sicurezza. Nel dimensionamento, dell'intervento laddove sussistano incertezze sulla modellazione idraulica del sottosuolo, può essere opportuno integrare le trattazioni teoriche con criteri empirici ed osservazioni dirette.
- Negli interventi con placcaggio e tiranti pretesi, l'aumento delle pressioni effettive viene fissato in modo da ottenere la predeterminata variazione del margine di sicurezza; lo sforzo necessario per ottenere detto aumento viene affidato a tiranti il cui progetto è svolto con i procedimenti di calcolo disponibili e con successive verifiche sperimentali in vera grandezza (prove di tiro).

- le reti poggiate sulla superficie topografica, e vincolate a tiranti, contribuiscono alla stabilità della coltre superficiale e vengono utilizzate nelle rocce intensamente fratturate. Il relativo dimensionamento (tipologia e maglia di rete, diametro delle funi, caratteristiche ed interasse dei tiranti) viene svolto portando in conto lo stato di fratturazione della roccia (interasse delle fratture, spessore della coltre, etc).

- nel miglioramento delle proprietà dei terreni l'incremento di resistenza da realizzare viene scelto in base al risultato che si vuole raggiungere; il controllo sperimentale all'inizio dei lavori è indispensabile per la messa a punto del procedimento e per la verifica delle ipotesi di progetto sul miglioramento della resistenza del terreno.

La scelta della tipologia più idonea è subordinata ad una serie di fattori tra i quali, per esempio:

- la stabilità attuale del pendio;
- la velocità della frana;
- le dimensioni del corpo di frana;
- la disponibilità e convenienza economica.

Le condizioni di stabilità del pendio, così come la velocità delle frane, possono giocare un ruolo rilevante in quanto certe lavorazioni sono possibili soltanto se sono verificate determinate condizioni di accessibilità, di mobilità e di sicurezza per gli uomini e per le attrezzature e sempre che sia assicurata, nel tempo, l'efficienza delle opere che si vanno ad eseguire.

La dimensione del corpo di frana ed in generale la sua geometria (ad esempio lo spessore) condizionano la possibilità di impiegare opere di sostegno, mentre l'inclinazione del pendio rende complessi semplici movimenti di terra che potrebbero, viceversa, risultare di grande utilità. E' evidente, altresì, che le difficoltà dell'intervento aumentano con le dimensioni del corpo di frana.

In definitiva, dalle precedenti considerazioni emerge che anche la scelta tipologica degli interventi di stabilizzazione richiede, così come tutte le fasi della progettazione, una chiara visione della problematica oggetto di studio che non può

prescindere dallo svolgimento accurato e responsabile di tutte le fasi discusse nella presente relazione.