

AUTORITA' DI BACINO REGIONALE

**PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO
IDROGEOLOGICO**

*Attività conoscitive propedeutiche alla
redazione della documentazione relativa alla
valutazione del rischio da frana (L.183/89 e
226/99)*

**SPECIFICHE TECNICHE
DELLE ANALISI DI STABILITA'**

Fisciano, 20.03.00

Nr. Rif. Aut. Bac. 99

- 1. Introduzione**
- 2. Il concetto di coefficiente di sicurezza**
- 3. Il valore numerico del coefficiente di sicurezza**
- 4. La scelta di una strategia per l'analisi di stabilità**
 - 4.1. La superficie di scorrimento*
 - 4.2. I parametri di resistenza*
 - 4.3. Il regime delle pressioni interstiziali*
- 6. Il controllo dell'efficacia degli interventi**

SPECIFICHE TECNICHE DELLE ANALISI DI STABILITÀ

1. Introduzione

L'analisi delle condizioni di stabilità di un pendio è uno dei problemi più complessi dell'Ingegneria Geotecnica a causa dei molteplici fattori che ad essa concorrono (geometria, proprietà meccaniche dei terreni e/o delle rocce, regime delle pressioni interstiziali, discontinuità, ecc.) e che determinano una molteplicità di meccanismi di collasso che vanno dai movimenti lenti di versante (colate in argilla) alla caduta di blocchi da ammassi rocciosi fratturati. Tali meccanismi possono innescarsi a seguito di fenomeni naturali (piogge intense, terremoti, erosioni, oscillazioni stagionali della falda, etc.) e/o di attività antropiche (incremento dei carichi lungo il versante, scavi al piede, variazione delle condizioni idrauliche al contorno, etc.).

Nella letteratura tecnica e scientifica, alla quale si rimanda per i necessari approfondimenti (Evangelista, 1997), possono ritrovarsi numerosi metodi che consentono la valutazione della stabilità di un pendio attraverso la determinazione di un coefficiente di sicurezza FS; pertanto le presenti Specifiche Tecniche non affrontano in alcun dettaglio tali metodi.

Nel seguito, si dà inoltre per scontato che il pendio oggetto dell'analisi sia geometricamente definito attraverso accurati rilievi topografici. Infine, si assume che la caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali costituenti il pendio e la individuazione delle condizioni al contorno (indagini geotecniche, monitoraggio, etc.) siano state svolte in stretta osservanza delle Specifiche Tecniche relative alle Indagini Geotecniche.

Le presenti Specifiche Tecniche sono, pertanto, esclusivamente finalizzate a fornire raccomandazioni, derivanti essenzialmente dalle conoscenze acquisite in campo tecnico-scientifico dopo molti anni di sperimentazione su casi reali, sul percorso metodologico da seguire per il conseguimento di risultati che siano di reale utilità nella risoluzione di casi reali.

2. Il concetto di coefficiente di sicurezza

Le ipotesi comuni ai metodi dell'equilibrio limite riguardano il legame costitutivo del terreno (rigido-plastico) ed il criterio di resistenza (Mohr-Coulomb).

Non è quindi possibile imporre le condizioni di congruenza degli spostamenti e la soluzione, pertanto, viene ottenuta utilizzando esclusivamente equazioni di equilibrio relative al volume di terreno o roccia delimitato dalla superficie topografica e dalla potenziale superficie di rottura. Con riferimento a quest'ultima, i vari metodi disponibili definiscono il coefficiente di sicurezza in svariati modi, comunque riconducibili alle seguenti tre definizioni:

- rapporto tra le forze che si oppongono allo scorrimento (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 scorrimento 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), vengono 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 ($c'_m = c' / FS_c$; $\tan \varphi'_m = \tan \varphi' / FS_\varphi$).

La diversità di definizioni comporta 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.

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 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.

3. Il valore numerico del coefficiente di sicurezza

Per quanto riguarda la *scelta del valore numerico* da attribuire al coefficiente di sicurezza, nel caso concreto essa 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.

Il D.M. 11.03.1988 non fornisce alcun valore per i pendii naturali, 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 incertezze insite nello studio dei pendii naturali sono di frequente superiori a quelle relative ai pendii artificiali richiamati dal citato D.M., appare opportuno assumere per il conseguimento di adeguati margini di sicurezza, coefficienti non inferiori a quelli proposti per i pendii artificiali ($FS \geq 1.3$).

Solo in situazioni particolari per le quali esistono i presupposti per una progettazione spinta e, contemporaneamente, non siano previste conseguenze catastrofiche sulla vita umana, sulle strutture, sulle infrastrutture e sulle attività economiche, il progettista potrà adottare coefficienti di sicurezza inferiori, che dovranno, in ogni caso, essere adeguatamente giustificati sulla base di una attenta analisi di tutti i fattori in gioco.

4. La scelta di una strategia per l'analisi di stabilità

La strategia attraverso la quale pervenire ad uno studio adeguato circa la stabilità di un pendio dipende dalla fase evolutiva in cui si trova il pendio stesso.

In linea di principio, qualunque pendio (in roccia o terreno) si troverà in una delle seguenti fasi:

- a) Pre-rottura. Il pendio è interessato da processi deformativi associati a variazioni dello stato tensionale, a fenomeni viscosi, ecc., senza che si sia ancora determinata una condizione di rottura;
- b) Prima rottura. I processi deformativi crescono di intensità fino a determinare la formazione di una superficie continua di taglio attraverso l'intera massa di terreno o roccia, o la separazione di un blocco o di una lastra di roccia da un costone;
- c) Post-rottura. A seguito degli spostamenti conseguenti alla prima rottura, il volume di terreno o roccia coinvolto si porta in una nuova configurazione di equilibrio attraverso movimenti di massa con velocità decrescenti fino all'arresto;
- d) Riattivazione occasionale. A seguito di una variazione delle condizioni del pendio conseguente a fenomeni naturali (piogge intense, terremoti, erosioni, oscillazioni stagionali della falda, etc.) o ad attività antropiche (incremento dei carichi lungo il versante, scavi al piede, variazione delle condizioni di drenaggio, etc.), viene a determinarsi una riattivazione del processo deformativo del pendio lungo una o più superfici preesistenti;
- e) Frana attiva. Per effetto di fenomeni naturali, il pendio è soggetto a spostamenti lungo superfici preesistenti che, seppur di modesta intensità, possono condizionare l'uso del versante.

I pendii costituiti da terreni a grana fina (limi e argille) possono trovarsi in ognuna delle fasi elencate; quelli in roccia o costituiti da coperture piroclastiche generalmente mostrano una fenomenologia ricadente nelle prime tre fasi. Bisogna, tuttavia, osservare che per queste ultime due classi di fenomeni lo studio della loro evoluzione spaziale e temporale conseguente al fenomeno di rottura risulta particolarmente rilevante per il

loro potenziale distruttivo che, come è noto, ha di frequente causato vittime oltre che danni ingenti alle strutture ed alle infrastrutture.

Per quanto riguarda i fenomeni che hanno sede negli ammassi rocciosi, l'argomento verrà trattato nelle "Specifiche Tecniche per i pendii in roccia". L'evoluzione dei fenomeni franosi nelle coltri piroclastiche è, a tutt'oggi, ancora oggetto di studio e, pertanto, la relativa modellazione fisico-matematica non è contemplata nelle presenti Specifiche. Alcune utili indicazioni al riguardo possono, tuttavia, trovarsi nell'allegato alle "Specifiche Tecniche per la Mappatura di dettaglio delle aree inondabili nell'ambito della Redazione del Piano Stralcio per la Difesa dalle Alluvioni" alle quali si rimanda.

Indipendentemente dalla natura dei materiali coinvolti e a parità di ogni altra condizione, poiché le analisi di stabilità dipendono fortemente (i) dalla superficie critica di scorrimento, (ii) dai parametri meccanici del materiale che costituisce il pendio, (iii) dal regime delle pressioni interstiziali, sarà necessario procedere alla individuazione della fase nella quale esso si trova al fine di indirizzare le scelte da cui poi dipende la reale utilità delle analisi.

4.1 La superficie di scorrimento

Il problema della individuazione della superficie critica di scorrimento (ossia quella cui compete il valore minimo di FS) riguarda ovviamente tutti quei casi in cui lo studio è relativo ad una superficie di neoformazione.

I metodi correntemente utilizzati per l'analisi di stabilità dei pendii, come ben noto, consentono la valutazione del coefficiente di sicurezza su superfici la cui forma e posizione siano state stabilite a priori.

Le forme che è possibile assumere nelle analisi sono le più svariate ma, in linea di principio e nella diffusa ipotesi di problema di deformazione piana¹, sono riconducibili a due grandi categorie:

- a) superfici di scorrimento piane o costituite da combinazioni di segmenti piani;
- b) superfici di scorrimento curve o mistilinee.

Tipicamente (ma non necessariamente) il caso a) è ascrivibile a fenomeni di instabilità in ammassi rocciosi, laddove esistono discontinuità che rappresentano superfici preferenziali di scorrimento, quello b) a fenomeni di instabilità in rocce sciolte.

La posizione della superficie andrà ricercata individuando quella cui compete il minimo coefficiente di sicurezza (superficie critica), che viene assunto come coefficiente di sicurezza del pendio.

¹ L'ipotesi di problema di deformazione piana non è strettamente necessaria. Essa ha essenzialmente la funzione di ridurre notevolmente l'onerosità del calcolo anche se è, ovviamente, conservativa. Con l'eccezione di pendii molto stretti e lunghi, detta ipotesi influenza in maniera trascurabile il coefficiente di sicurezza.

4.2 I parametri di resistenza

E' ben noto che il legame tensioni-deformazioni di un materiale quale il terreno o una roccia è nella maggior parte dei casi di tipo fragile: all'aumentare delle deformazioni, lo stato tensionale cresce fino a raggiungere un valore di picco (resistenza di picco), cui fa seguito una caduta verso valori progressivamente minori fino all'attingimento di valori residui (resistenza residua) in corrispondenza di deformazioni estremamente elevate.

Pertanto, in tutti quei casi in cui le informazioni disponibili e gli studi svolti evidenziano che il pendio si trova in una fase di pre-rottura, le superfici lungo le quali si dovranno eseguire le analisi di stabilità saranno necessariamente di neoformazione e, quindi, i parametri di resistenza da utilizzare saranno prossimi o pari a quelli di picco.

Bisogna, infatti, osservare che l'ipotesi di contemporanea mobilitazione delle resistenze di picco lungo la superficie di rottura può comportare una notevole sovrastima delle reali condizioni di stabilità del pendio, sovrastima tanto maggiore quanto maggiore è la fragilità del materiale. È ben noto, infatti, che in un pendio si verifica una elevata concentrazione di sforzi tangenziali al piede del versante, che tendono a diminuire man mano che ci si allontana da esso. A causa della diminuzione di resistenza conseguente al verificarsi di spostamenti in tali zone, si ha una ridistribuzione degli sforzi tangenziali lungo l'intera superficie con conseguente aggravio degli stati tensionali in zone precedentemente meno sollecitate. Questo fenomeno, che prende il nome di rottura progressiva, comporta valori medi di resistenza mobilitati lungo l'intera superficie compresi tra i valori di picco e quelli residui. Ne consegue che la scelta di un appropriato valore della resistenza costituisce un elemento di particolare rilevanza nella valutazione delle condizioni di stabilità per superfici di neoformazione.

In quei casi in cui, invece, il pendio è stato soggetto in passato a fenomeni di scorrimento lungo una superficie nota sulla base delle indagini geotecniche eseguite (fase di post-rottura e riattivazione occasionale, frana attiva), andranno condotte delle analisi a ritroso (back-analyses) finalizzate alla valutazione dei parametri di resistenza in grado di riprodurre il fenomeno osservato; in altre parole, sarà necessario eseguire delle analisi imponendo un coefficiente di sicurezza $FS = 1$ e determinando i parametri di resistenza che, lungo quella superficie di scorrimento, soddisfino tale condizione.

4.3 Il regime delle pressioni neutre

La modellazione delle pressioni neutre può essere finalizzata a molteplici obiettivi: la definizione del coefficiente di sicurezza di un pendio non interessato da movimenti franosi; l'oggettivazione delle cause innescanti il movimento franoso; la progettazione di interventi strutturali e non strutturali; la verifica e/o il controllo degli interventi di stabilizzazione, etc..

Tralasciando, in questa sede, i modelli a "scatola chiusa" che, normalmente, affrontano il problema senza portare in conto i meccanismi fisici che regolano il legame tra causa (variazione delle condizioni idrauliche al contorno) ed effetto (variazione spaziale e temporale delle pressioni neutre), si affronteranno, nel prosieguo, le problematiche connesse all'utilizzo dei modelli completi di versante. Questi ultimi, infatti, sulla base di una corretta posizione fisico-matematica del problema, consentono di riprodurre i processi fisici che governano i moti filtranti.

Occorre, fin d'ora, osservare che l'utilizzo di tali modelli, per il conseguimento di uno o più degli obiettivi suindicati, necessita di adeguate conoscenze sul contesto geologico-ambientale nel quale ha sede il pendio oggetto di studio.

Il contesto geologico si estrinseca attraverso le modalità di alimentazione delle falde sotterranee, la successione stratigrafica dei terreni, le loro caratteristiche fisico-meccaniche, le proprietà idrauliche degli acquiferi, intendendosi per tali le formazioni che possono essere attraversate da consistenti volumi d'acqua anche con gradienti idraulici modesti, e degli strati a minore permeabilità.

Pertanto, per l'applicazione dei modelli di seguito descritti, risulta necessario acquisire:

- un soddisfacente inquadramento del pendio nel contesto geologico circostante;

- una adeguata conoscenza dei caratteri del regime delle acque sotterranee mediante misure di pressioni neutre positive e negative protratte per un congruo periodo di tempo lungo numerose verticali;
- una soddisfacente caratterizzazione dei vari acquiferi presenti nel sottosuolo e delle loro interazioni, mediante appropriate indagini idrogeologiche e geotecniche;
- una approfondita conoscenza delle proprietà idrauliche dei terreni in condizioni di totale e di parziale saturazione.

Solo a valle dell'acquisizione di tali conoscenze, risulterà possibile costruire un appropriato schema geotecnico del sottosuolo sul quale condurre le analisi con i modelli completi di versante, che devono avere caratteristiche tali da riprodurre, nel migliore dei modi, le variazioni di pressioni neutre osservate con la strumentazione appositamente installata per un congruo periodo di tempo.

Una volta validato il modello scelto sarà possibile procedere al suo utilizzo per la previsione della variazione delle pressioni neutre in funzione delle variazioni delle condizioni idrauliche al contorno stabilite in fase di progetto.

La letteratura sui modelli completi di versante è quanto mai vasta e variegata dal momento che in essa si ritrovano contributi provenienti da numerose discipline quali quelle idrauliche, agrarie e geotecniche (Cascini, 1996).

A grandi linee, è però possibile raggruppare i vari modelli secondo due grandi categorie. Alla prima sono da ascrivere quei modelli che fanno riferimento alla formulazione classica del problema dei moti filtranti in regime vario, laddove viene analizzata la sola parte satura del dominio sede del fenomeno. La formulazione matematica del problema contempla la scrittura dell'equazione di continuità, della legge di Darcy e dell'equazione traduce la condizione al contorno che, lungo la superficie freatica (la cui posizione costituisce una delle incognite del problema), la pressione del fluido sia pari a zero.

Di frequente tali modelli adottano l'ipotesi di scheletro solido incompressibile e richiedono, per la loro applicazione, l'utilizzo di tecniche di discretizzazione numerica.

Come già in precedenza osservato, l'analisi dei moti filtranti nella classica formulazione esposta riguarda esclusivamente la zona al di sotto della superficie freatica e, quindi, la sola parte satura del dominio sede del fenomeno.

Tale approccio ignora, pertanto, completamente i processi di moto che hanno luogo nella zona parzialmente satura compresa tra il piano campagna e la superficie freatica che, come è noto, costituisce la zona nella quale hanno sede gli scambi idrici (evapotraspirazione, infiltrazione delle acque meteoriche) con l'atmosfera.

Numerosi Autori, rimanendo ancora nell'ambito dell'approccio saturo, sono pervenuti alla formulazione di modelli semplificati che consentono una più aderente simulazione del fenomeno reale. Con tali modelli è ad esempio possibile stimare i volumi d'acqua effettivamente infiltratisi provenienti dalle precipitazioni meteoriche, i tempi necessari a questi ultimi per il raggiungimento della superficie freatica, etc. (Green e Ampt, 1911; Lumb, 1975).

Un confronto tra i risultati ottenibili impiegando tali modelli e quelli più complessi evidenzia che questi ultimi sono utilizzabili con sufficiente approssimazione quando:

- le intensità di precipitazione meteorica sono superiori alle caratteristiche di infiltrabilità del terreno (condizione cosiddetta di "ponding");
- la superficie freatica si trova ad una distanza sufficientemente lontana dal piano campagna.

In alternativa all'approccio saturo, ed alle sue successive integrazioni per portare in conto i fenomeni non considerati nell'impostazione classica, fa riscontro una formulazione del problema che, riferendosi all'intero dominio fisico, analizza senza soluzione di continuità, e quindi in un unico contesto, i processi di moto nelle zone sature ed in quelle parzialmente sature. Tale tipo di approccio riflette, ovviamente, l'intento di modellare la reale natura trifase (aria-acqua-terreno) del terreno.

Esso consente una soddisfacente analisi dei moti filtranti a patto che si siano determinate sperimentalmente le curve caratteristiche del materiale che, come è noto, sintetizzano i legami esistenti tra il coefficiente di permeabilità, il grado di saturazione e la pressione neutra negativa.

L'adozione di tali modelli comporta, ovviamente, difficoltà superiori a quelle dell'approccio saturo, in quanto giocano un ruolo determinante le non poche difficoltà

sperimentali connesse alla determinazione delle curve caratteristiche. Le maggiori difficoltà sono, d'altra parte, ampiamente compensate dalla possibilità di affrontare la modellazione con maggiore aderenza alla realtà fisica dei fenomeni, circostanza, questa, che rende possibile l'analisi di situazioni di campo non riproducibili in modo soddisfacente dall'approccio saturo.

Bibliografia

Cascini L. (1996) – *Il regime delle falde idriche*. Relazione generale al Tema I del III Convegno del Gruppo Nazionale per il Coordinamento degli Studi in Ingegneria Geotecnica – Mondovì (CN), 93 pp.

Evangelista A. (1997) – *Analisi di stabilità di pendii in rocce sciolte*. In *Interventi di stabilizzazione dei pendii*. CISM (Udine), pp. 185-237.

Green W.H., Ampt G.A. (1911) – *Studies on Soil Physics: 1. Flow of air and water through soils*. *Journal of Agr. Sci.*, Vol. 4, pp. 1-24.

Lumb P. (1975) – *Slope failures in Hong Kong*. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, Vol. 8, pp. 31-65.