

Drenare per stabilizzare: il ruolo decisivo delle acque sotterranee nelle grandi frane. Il caso della frana di Po Shan (Hong Kong)

AUTORE: **MASSIMO CHIARELLI**, *Ingegnere esperto in tecniche avanzate di scavo in sotterraneo* – tunnelconsulting.it

ABSTRACT

Le grandi frane profonde rappresentano uno dei fenomeni geologici più complessi e pericolosi per la sicurezza del territorio, delle infrastrutture e degli insediamenti urbani. Numerosi studi hanno dimostrato come l'acqua sotterranea costituisca uno dei principali fattori di controllo dell'equilibrio dei versanti, influenzando direttamente le pressioni interstiziali, la resistenza al taglio dei terreni e l'evoluzione dei movimenti franosi. In questo contesto, le gallerie drenanti si sono affermate come una delle tecniche più efficaci per la stabilizzazione di grandi masse instabili, soprattutto nei casi in cui le dimensioni del fenomeno rendono impraticabili gli interventi strutturali tradizionali.

L'articolo analizza il ruolo dell'acqua nell'innesco e nella riattivazione delle frane profonde, illustrando i meccanismi geotecnici che governano la perdita di stabilità dei versanti. Vengono inoltre descritte le principali tipologie di gallerie impiegate per il drenaggio e il controllo delle acque sotterranee, i criteri progettuali, le tecniche costruttive e i meccanismi attraverso cui tali opere contribuiscono all'aumento del fattore di sicurezza del pendio. Particolare attenzione è dedicata alla riduzione delle pressioni interstiziali, all'abbassamento della falda e alla riorganizzazione del regime idrogeologico interno al versante.

Infine, viene evidenziato come le gallerie drenanti rappresentino una soluzione strategica per la mitigazione del rischio franoso, consentendo di intervenire direttamente sulle cause dell'instabilità e garantendo benefici duraturi nel tempo. L'esperienza maturata in numerosi contesti internazionali conferma, infatti, che il controllo delle acque sotterranee costituisce uno degli strumenti più efficaci per la gestione e la stabilizzazione delle grandi frane profonde.

1. Introduzione

La stabilità dei versanti rappresenta una delle problematiche più complesse ed affascinanti dell'ingegneria geotecnica. I fenomeni franosi costituiscono infatti il risultato dell'interazione tra fattori geologici, geomorfologici, idrologici e climatici che agiscono contemporaneamente all'interno di sistemi naturali estremamente complessi. In molte aree montane e collinari del mondo, la presenza di versanti caratterizzati da condizioni di equilibrio precario espone territori, infrastrutture e insediamenti abitativi a livelli di rischio elevati.

Le grandi frane profonde si differenziano dai fenomeni superficiali per la loro scala e per la profondità delle superfici di scorrimento. Mentre le frane superficiali interessano generalmente pochi metri di terreno e sono spesso associate a eventi meteorici di breve durata, le grandi instabilità profonde possono coinvolgere volumi dell'ordine di milioni o decine di milioni di metri cubi, estendendosi a profondità di decine o addirittura centinaia di metri.

In questi contesti, le tecniche di consolidamento tradizionali mostrano spesso limiti significativi. Realizzare muri di sostegno, paratie o opere di contrasto direttamente capaci di opporsi alle enormi forze generate da tali masse può risultare tecnicamente difficile e, in molti casi, economicamente insostenibile. Per questo motivo l'ingegneria geotecnica moderna tende sempre più a intervenire sulle cause che determinano l'instabilità piuttosto che tentare di contrastarne esclusivamente gli effetti.

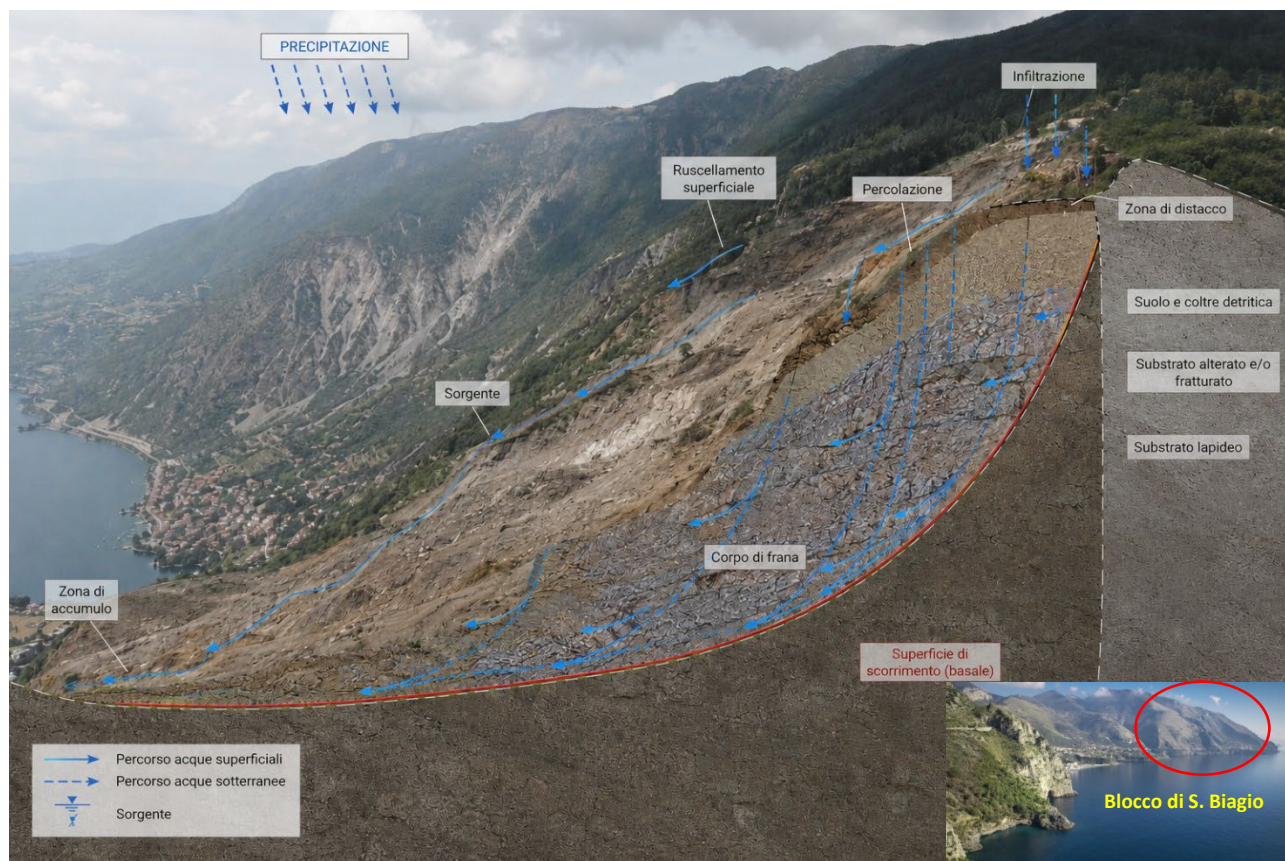


Figura 1 – Grande frana interessante le infrastrutture e le abitazioni del versante Tirrenico nei pressi di Maratea (PZ). La Grande frana si inserisce in un contesto più ampio di enormi scendimenti gravitativi lungo la fascia costiera che proseguono nei fondali marini dove, la profonda depressione del Mar Tirreno, esercita un ruolo fondamentale di richiamo – Massimo Chiarelli (2018).

Tra le tecniche che meglio incarnano questa filosofia progettuale vi è l'impiego delle gallerie drenanti profonde. Queste opere consentono di modificare il regime idrogeologico interno del versante, riducendo le pressioni dell'acqua che spesso rappresentano il principale fattore di controllo dell'equilibrio geomeccanico. L'esperienza maturata in numerosi interventi realizzati in Europa, Asia e Nord America ha dimostrato che il drenaggio profondo può produrre incrementi di stabilità molto significativi, anche in fenomeni di dimensioni eccezionali.

2. Il ruolo dell'acqua nell'innescare delle grandi frane

Per comprendere perché le gallerie drenanti siano così efficaci è necessario analizzare il ruolo svolto dall'acqua nei processi di instabilità dei versanti.

Dal punto di vista geotecnico, un pendio naturale può essere considerato come un sistema nel quale le forze resistenti e le forze destabilizzanti si trovano in un delicato equilibrio. La gravità tende costantemente a spingere la massa verso valle, mentre la resistenza meccanica dei terreni e delle rocce si oppone a questo movimento. L'acqua è uno degli elementi che più influenzano tale equilibrio.

Quando le precipitazioni si infiltrano nel sottosuolo, alimentano falde e circuiti idrici sotterranei che possono estendersi per centinaia di metri all'interno del versante. In condizioni favorevoli, il sistema naturale di drenaggio è in grado di smaltire l'acqua senza provocare alterazioni significative. Tuttavia, quando l'apporto idrico supera la capacità drenante del pendio, iniziano ad accumularsi pressioni che modificano profondamente il comportamento meccanico dei materiali.

L'effetto più importante riguarda la diminuzione della tensione efficace. In termini semplici, una parte del peso del terreno non viene più trasmessa direttamente attraverso il contatto tra le particelle solide, ma viene sostenuta dall'acqua presente nei pori. Ciò comporta una riduzione dell'attrito interno e della resistenza al taglio.

Questo fenomeno assume particolare rilevanza nelle grandi frane profonde, dove la superficie di scorrimento si sviluppa spesso lungo livelli argillosi o zone alterate già caratterizzate da una resistenza relativamente bassa. In tali condizioni, anche variazioni modeste delle pressioni interstiziali possono provocare accelerazioni significative del movimento.

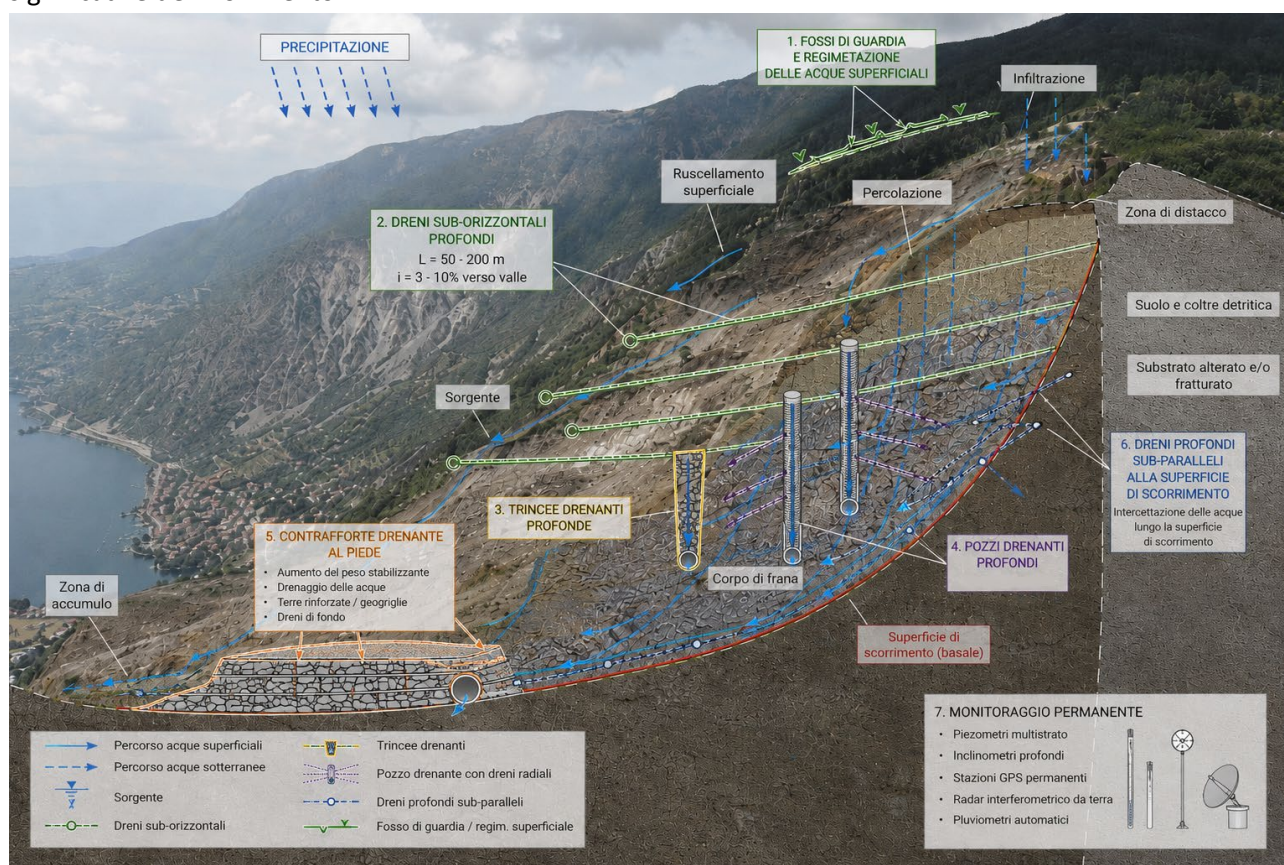


Figura 2 – Rappresentazione schematica semplificata dello studio di progetto degli interventi di consolidamento di una grande frana nei pressi di Maratea (PZ) – Massimo Chiarelli (2018).

L'acqua contribuisce inoltre ad aumentare il peso complessivo della massa instabile e può generare spinte idrauliche lungo superfici di discontinuità, amplificando ulteriormente le condizioni di instabilità. È proprio questa combinazione di effetti che rende il controllo delle acque sotterranee uno degli strumenti più potenti per la stabilizzazione dei versanti.

2.1 Il ciclo dell'acqua all'interno del versante

Per comprendere il ruolo dell'acqua è utile immaginare il versante come una gigantesca struttura naturale attraversata continuamente da flussi idrici.

Quando la pioggia raggiunge il suolo, solo una parte dell'acqua scorre superficialmente lungo i corsi d'acqua. Una quota significativa si infiltra nel terreno attraverso:

- pori dei terreni sciolti;
- fratture delle rocce;
- giunti stratigrafici;
- faglie e zone di alterazione;
- cavità e discontinuità naturali.

L'acqua infiltrata inizia, quindi, un percorso spesso molto lento e complesso verso le zone più profonde del sottosuolo.

In un versante possono coesistere diversi sistemi acquiferi:

- falde profonde;
- falde sospese;
- livelli saturi localizzati;
- circuiti idrici all'interno di ammassi rocciosi fratturati.

Questa rete sotterranea può estendersi per centinaia di metri e accumulare enormi quantità d'acqua.

Quando il sistema di drenaggio naturale non è più in grado di smaltire rapidamente l'acqua infiltrata, iniziano a svilupparsi condizioni favorevoli all'instabilità.

2.2 L'acqua e la perdita di resistenza dei terreni

Il meccanismo più importante attraverso il quale l'acqua influenza la stabilità riguarda la riduzione della resistenza al taglio dei materiali.

Per comprendere questo fenomeno è utile considerare il comportamento microscopico di un terreno.

In un terreno asciutto o poco saturo, il peso del versante viene trasmesso principalmente attraverso il contatto diretto tra le particelle solide.

I granuli si sostengono reciprocamente e sviluppano forze di attrito che contribuiscono alla stabilità.

Quando invece i pori si riempiono d'acqua e questa entra in pressione, parte del carico viene trasferita al fluido.

Il risultato è una diminuzione della forza che tiene premute tra loro le particelle solide. Dal punto di vista meccanico, il terreno diventa progressivamente meno resistente.

È come se la struttura interna del materiale perdesse parte della propria capacità di opporsi allo scorrimento. Questo fenomeno costituisce uno dei principi fondamentali della meccanica dei terreni ed è alla base di gran parte dei dissesti gravitativi.

2.3 La pressione interstiziale: il vero motore delle grandi frane

L'acqua contenuta nei vuoti del terreno esercita una pressione chiamata pressione interstiziale.

Si tratta di una grandezza fondamentale perché controlla direttamente la resistenza meccanica del versante.

Quando la pressione interstiziale aumenta:

- diminuisce la tensione efficace;
- si riduce la resistenza al taglio;
- aumenta la probabilità di scorrimento.

Nelle grandi frane profonde il movimento è spesso strettamente correlato all'andamento delle pressioni interstiziali.

Le reti di monitoraggio installate nei versanti instabili mostrano frequentemente che:

- durante periodi secchi le pressioni diminuiscono;

- le velocità di movimento rallentano;
- durante periodi piovosi le pressioni aumentano;
- la frana accelera.

In molti casi la correlazione è talmente evidente da consentire la previsione delle fasi di accelerazione sulla base dell'andamento piezometrico.

2.4 L'innalzamento della falda e la destabilizzazione del pendio

L'innalzamento della falda acquifera è uno dei principali fattori che possono provocare l'insacco o la riattivazione di grandi frane profonde. In molti versanti, infatti, la stabilità dipende dall'equilibrio tra le forze che tendono a far scivolare la massa verso valle e quelle che si oppongono al movimento. Quando la quantità di acqua presente nel sottosuolo aumenta, questo equilibrio può essere compromesso.

Le cause dell'innalzamento della falda sono generalmente legate a periodi di precipitazioni intense o prolungate, allo scioglimento della neve, a infiltrazioni provenienti da bacini artificiali o a modifiche antropiche del sistema di drenaggio naturale. L'acqua infiltrata penetra progressivamente nel sottosuolo e può impiegare settimane o mesi per raggiungere gli strati più profondi del versante. Per questo motivo le frane spesso accelerano con un certo ritardo rispetto agli eventi meteorologici che le hanno innescate.

Dal punto di vista geotecnico, il principale effetto dell'innalzamento della falda è l'aumento delle **pressioni interstiziali**, ossia delle pressioni esercitate dall'acqua contenuta nei pori del terreno. Quando queste pressioni crescono, diminuisce la **tensione efficace**, cioè la quota di carico realmente sostenuta dallo scheletro solido del terreno. Di conseguenza si riduce la resistenza al taglio dei materiali e il versante diventa più vulnerabile allo scorrimento.

POZZO DRENANTE DI GRANDE DIAMETRO IN PENDIO INSTABILE

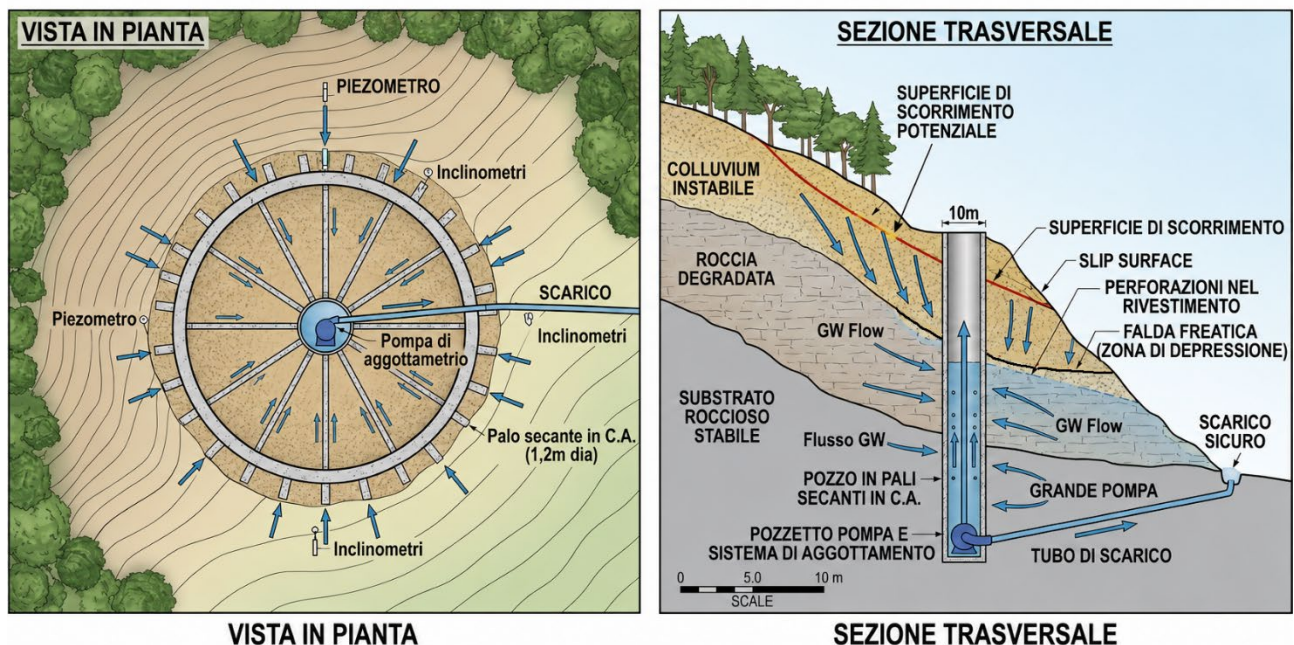


Figura 3 – Rappresentazione schematica in pianta e sezione di un pozzo drenante di grande diametro con pompa eventuale installata a fondo pozzo per l'aggottamento e allontanamento dell'acqua – Massimo Chiarelli (2026).

Nelle grandi frane profonde questo fenomeno è particolarmente critico perché le superfici di scorrimento si sviluppano spesso lungo livelli argillosi, zone alterate o contatti geologici caratterizzati da resistenza già

ridotta. L'aumento della pressione dell'acqua in corrispondenza di tali superfici può ridurre ulteriormente l'attrito disponibile e favorire il movimento della massa instabile.

L'acqua contribuisce inoltre ad aumentare il peso complessivo del versante. La saturazione dei terreni comporta infatti un incremento delle forze gravitazionali che agiscono verso valle. In pratica l'acqua esercita una doppia azione destabilizzante: da un lato riduce la resistenza del terreno, dall'altro aumenta le forze che tendono a provocare lo scivolamento.

Un ulteriore elemento di criticità è rappresentato dalla formazione di **sovrapressioni localizzate**. Nei versanti costituiti da materiali con diversa permeabilità, l'acqua può accumularsi sopra strati poco permeabili, generando zone caratterizzate da pressioni molto elevate. Queste aree rappresentano spesso i punti più sensibili all'innescio della frana.

Per tali ragioni, il controllo della falda costituisce uno degli obiettivi principali degli interventi di stabilizzazione. Opere come gallerie drenanti, dreni suborizzontali e pozzi drenanti consentono di abbassare il livello piezometrico e ridurre le pressioni interstiziali, migliorando significativamente le condizioni di stabilità del versante.

In conclusione, l'innalzamento della falda acquifera rappresenta uno dei meccanismi più importanti nella genesi delle grandi frane, poiché altera direttamente il comportamento geomeccanico del pendio. La comprensione dei processi di infiltrazione e circolazione delle acque sotterranee è quindi fondamentale per la valutazione del rischio e per la progettazione di efficaci interventi di mitigazione.

2.5 L'influenza delle attività umane

Anche le attività antropiche possono modificare profondamente il regime idrico di un versante.

Tra i fattori più comuni si possono citare:

- perdite da acquedotti;
- dispersioni da reti fognarie;
- irrigazione intensiva;
- deviazioni dei corsi d'acqua;
- costruzione di invasi artificiali;
- urbanizzazione diffusa.

In alcuni casi questi interventi alterano il delicato equilibrio idrogeologico naturale e contribuiscono alla riattivazione di fenomeni franosi preesistenti.

2.6 Il drenaggio come soluzione più efficace

Poiché l'acqua costituisce il principale fattore di controllo della stabilità di molti versanti, il drenaggio rappresenta spesso l'intervento più razionale.

Le opere drenanti, tra cui gallerie, dreni suborizzontali, pozzi drenanti e trincee drenanti, mirano a:

- abbassare il livello piezometrico;
- ridurre le pressioni interstiziali;
- intercettare le vie di flusso sotterranee;
- limitare la formazione di sovrapressioni.

Dal punto di vista geotecnico, questi interventi agiscono direttamente sulla causa dell'instabilità anziché contrastarne semplicemente gli effetti.

3. LE GALLERIE IMPIEGATE PER LA STABILIZZAZIONE DEI VERSANTI

Le gallerie realizzate all'interno di un versante instabile rappresentano una delle più avanzate applicazioni dell'ingegneria geotecnica e idrogeologica. A differenza delle opere superficiali, che agiscono prevalentemente sugli effetti dell'instabilità, le gallerie consentono di intervenire direttamente nelle zone profonde del pendio, dove spesso si sviluppano i meccanismi che controllano l'evoluzione della frana.

La loro funzione può essere molto diversa a seconda della natura del dissesto, delle caratteristiche geologiche del sito e degli obiettivi progettuali. In alcuni casi il loro scopo principale è il drenaggio delle acque sotterranee; in altri consentono di raggiungere superfici di scorrimento profonde per eseguire monitoraggi, indagini o interventi di consolidamento. Nei progetti più complessi, una stessa galleria può svolgere simultaneamente più funzioni.

3.1 L'evoluzione storica delle gallerie drenanti

L'impiego delle gallerie drenanti per la stabilizzazione dei versanti ha una storia lunga oltre un secolo. Le prime applicazioni sistematiche risalgono alla fine del XIX e all'inizio del XX secolo, quando gli ingegneri impegnati nella realizzazione di infrastrutture ferroviarie e stradali, iniziarono a osservare la stretta relazione tra presenza di acqua e instabilità dei pendii.

Con il passare dei decenni, l'esperienza accumulata in numerosi interventi dimostrò che il drenaggio profondo poteva rappresentare una soluzione estremamente efficace per il controllo delle grandi frane.

Particolarmente significativo fu il contributo proveniente dal Giappone, dove le condizioni climatiche e geomorfologiche favoriscono la frequente insorgenza di movimenti franosi.

A partire dagli anni Cinquanta e Sessanta, il Giappone sviluppò una vera e propria scuola di progettazione dedicata alle opere drenanti profonde. Migliaia di gallerie e sistemi di drenaggio furono realizzati per la protezione di centri abitati, infrastrutture e aree agricole. I risultati ottenuti contribuirono in modo decisivo alla diffusione di questa tecnologia in molti altri Paesi.



Figura 4 – Rappresentazione di una galleria drenante e di alleggerimento di un versante instabile soggetto ad una DGPV – Ipotesi di intervento – Massimo Chiarelli (2026).

Anche nelle regioni alpine europee le gallerie drenanti trovarono ampia applicazione. In Svizzera, Austria, Francia e Italia numerosi versanti instabili furono stabilizzati attraverso reti di cunicoli drenanti associati a perforazioni profonde. Queste esperienze hanno fornito una vasta base di dati che oggi costituisce il riferimento per la progettazione moderna.

3.2 La filosofia geotecnica del drenaggio profondo

L'aspetto più interessante delle gallerie drenanti risiede nella loro filosofia progettuale.

Tradizionalmente, molte opere di stabilizzazione sono concepite per aumentare direttamente le forze resistenti. Muri, paratie, tiranti e ancoraggi cercano di opporsi al movimento sviluppando una resistenza meccanica aggiuntiva.

Le gallerie drenanti seguono invece una logica differente. Esse non cercano di trattenere la frana, ma di modificare le condizioni che la rendono possibile.

In termini geotecnici, l'obiettivo consiste nel ridurre le pressioni interstiziali e aumentare le tensioni efficaci all'interno del versante. Questo approccio produce un miglioramento della resistenza al taglio lungo le superfici di scorrimento e porta il sistema verso una nuova condizione di equilibrio.

Si tratta di una strategia particolarmente efficace nelle grandi frane profonde, dove la presenza dell'acqua rappresenta spesso il principale fattore destabilizzante. In tali situazioni il drenaggio non costituisce semplicemente un'opera accessoria, ma diventa il vero elemento centrale dell'intervento di stabilizzazione.

Per questo motivo le gallerie drenanti sono oggi considerate una delle soluzioni più eleganti e potenti dell'ingegneria geotecnica: invece di combattere la frana con la forza, ne modificano le condizioni interne fino a ridurre naturalmente la propensione al movimento.

4. Gallerie drenanti profonde

4.1 Principio di funzionamento

Le gallerie drenanti profonde costituiscono la tipologia più diffusa e, storicamente, quella che ha fornito i migliori risultati nella stabilizzazione delle grandi frane.

L'idea alla base di queste opere è relativamente semplice: intercettare le zone del versante caratterizzate da elevate pressioni piezometriche e creare una via di drenaggio artificiale che permetta all'acqua di defluire per gravità.

Quando una galleria viene scavata al di sotto del livello piezometrico, essa si comporta come un "collettore drenante" capace di attirare l'acqua presente nel terreno circostante.

Con il passare del tempo si sviluppa attorno alla galleria una zona di depressione piezometrica che può estendersi per centinaia di metri, riducendo progressivamente le pressioni interstiziali all'interno della massa instabile.

4.2 Configurazione tipica e l'effetto sul versante

Una galleria drenante è generalmente costituita da:

- cunicolo principale;
- nicchie tecniche;
- sistemi di raccolta delle acque;
- canalette di fondo;
- punti di monitoraggio.

Dal cunicolo vengono poi eseguiti numerosi fori drenanti suborizzontali/subverticali che si sviluppano a ventaglio nel terreno circostante.

Questi drenaggi possono raggiungere lunghezze considerevoli, talvolta superiori a 300÷500 metri.

L'insieme galleria-fori drenanti crea una rete artificiale di drenaggio estremamente efficace.

L'effetto stabilizzante non è immediato. In genere si osservano tre fasi:

a) *Prima fase*

Subito dopo lo scavo si verifica un primo drenaggio delle zone direttamente intercettate.

b) *Seconda fase*

Nei mesi successivi si sviluppa il cono di depressione piezometrica. L'acqua presente nei materiali circostanti inizia a migrare verso la galleria.

c) Terza fase

Dopo alcuni anni, il sistema raggiunge una nuova configurazione di equilibrio idrogeologico. È in questa fase che si manifestano i massimi benefici in termini di stabilità.

4.3 Ambiti applicativi

Le gallerie drenanti sono particolarmente efficaci in presenza di:

- frane profonde lente;
- deformazioni gravitativo-profonde di versante DGPV;
- versanti in roccia fratturata;
- terreni argillosi sovraconsolidati;
- aree interessate da elevata circolazione idrica sotterranea.

4.4 Gallerie esplorative e di accesso geotecnico

Nelle grandi frane profonde uno dei principali problemi è la scarsa conoscenza delle condizioni geologiche reali presenti a decine o centinaia di metri sotto la superficie.

I sondaggi forniscono informazioni puntuali, ma spesso non consentono una visione completa del fenomeno. Le gallerie esplorative vengono realizzate proprio per accedere direttamente all'interno del versante.

Una volta raggiunte le zone profonde è possibile osservare direttamente:

- litologie;
- superfici di taglio;
- zone cataclaste;
- livelli argillificati;
- sistemi di fratturazione.

La qualità delle informazioni ottenibili è incomparabilmente superiore rispetto a quella derivante dalle sole indagini indirette.

La galleria diventa un vero e proprio laboratorio sotterraneo.

È possibile installare:

- piezometri;
- estensimetri;
- celle di pressione;
- sistemi di monitoraggio delle deformazioni;
- sensori di temperatura;
- strumentazione geofisica.

In questo modo il comportamento della frana può essere osservato in continuo.

Infatti, molti grandi interventi di stabilizzazione sono stati preceduti dalla realizzazione di gallerie esplorative.

Queste opere consentono di:

- validare i modelli geologici;
- verificare la posizione delle superfici di scorrimento;
- identificare gli acquiferi responsabili delle sovrappressioni;
- ottimizzare la progettazione definitiva.

In alcuni casi, invece, la galleria viene concepita principalmente come infrastruttura di monitoraggio.

Questo approccio è particolarmente utile quando il movimento franoso non può essere completamente arrestato ma deve essere controllato nel tempo.

La presenza di un accesso permanente consente di effettuare:

- ispezioni periodiche;
- misure geotecniche;
- controlli piezometrici;
- manutenzione della strumentazione.

Le informazioni raccolte permettono di comprendere l'evoluzione del fenomeno e di individuare eventuali accelerazioni.

4.5 Gallerie drenanti e sistemi di allerta Early Warning

Le gallerie possono essere integrate con sistemi automatici di monitoraggio che trasmettono dati in tempo reale a centri di controllo.

Nella gestione delle grandi frane profonde, le opere di stabilizzazione non rappresentano sempre l'unico strumento disponibile per la riduzione del rischio. In molti contesti, infatti, le dimensioni del fenomeno, la complessità geologica del versante o la presenza di infrastrutture particolarmente vulnerabili rendono necessario affiancare agli interventi strutturali un sistema di controllo continuo capace di rilevare tempestivamente eventuali variazioni delle condizioni di stabilità. In questo contesto si inseriscono i sistemi di allerta precoce (Early Warning Systems – EWS), oggi considerati uno degli strumenti più efficaci per la gestione del rischio associato alle grandi instabilità di versante.



Figura 5 - Monitoraggio in modalità statica con acquisizione in continuo (Frana di Lago, CS). Fonte: archivio GEO-GFI ISPRA.

Un sistema di allerta precoce può essere definito come un insieme integrato di strumenti di monitoraggio, procedure di analisi e protocolli operativi finalizzati a individuare in anticipo le condizioni che potrebbero precedere un'accelerazione della frana o il verificarsi di un evento potenzialmente pericoloso. L'obiettivo non è soltanto osservare il comportamento del versante, ma trasformare i dati raccolti in informazioni utili per supportare le decisioni e attivare misure di protezione della popolazione e delle infrastrutture esposte. Nelle grandi frane profonde il monitoraggio assume un ruolo particolarmente importante poiché tali fenomeni raramente si manifestano in modo improvviso. Nella maggior parte dei casi il collasso è preceduto da una fase di evoluzione progressiva durante la quale il versante mostra segnali di instabilità sempre più evidenti. Tali segnali possono consistere nell'aumento delle deformazioni, nell'incremento delle pressioni interstiziali, nell'innalzamento della falda o nella comparsa di nuove fessurazioni superficiali. La capacità di riconoscere e interpretare questi precursori

rappresenta il fondamento di ogni sistema di allerta efficace.

L'architettura di un sistema Early Warning si basa generalmente su una rete di monitoraggio multidisciplinare. Tra gli strumenti più utilizzati vi sono gli inclinometri, che consentono di misurare gli spostamenti in profondità e di individuare l'evoluzione delle superfici di scorrimento; i piezometri, impiegati per controllare l'andamento delle pressioni interstiziali e delle oscillazioni della falda; le stazioni meteorologiche, che registrano precipitazioni, temperatura e altri parametri climatici; i sistemi GPS ad alta precisione, in grado di rilevare spostamenti millimetrici della superficie del terreno; e i radar interferometrici terrestri o satellitari, che permettono di monitorare deformazioni su ampie porzioni di versante con elevata frequenza temporale.

Negli ultimi anni lo sviluppo delle tecnologie digitali ha consentito un notevole miglioramento delle capacità di monitoraggio. Molti sistemi moderni operano in tempo reale e trasmettono automaticamente i dati a centrali di controllo nelle quali algoritmi dedicati analizzano continuamente le informazioni provenienti dalla strumentazione. Questo approccio consente di individuare rapidamente eventuali anomalie e di confrontarle con soglie di attenzione definite sulla base delle caratteristiche specifiche del versante.

La definizione delle soglie di allarme rappresenta uno degli aspetti più delicati dell'intero sistema. Esse vengono generalmente stabilite attraverso l'analisi storica del comportamento della frana e possono riguardare parametri differenti, quali la velocità di spostamento, il tasso di accelerazione delle deformazioni, il livello piezometrico o l'intensità delle precipitazioni. In molti casi vengono individuati diversi livelli di criticità, associati a procedure operative progressive che possono andare dall'intensificazione del monitoraggio fino all'attivazione di piani di emergenza e all'evacuazione delle aree a rischio.

Un aspetto fondamentale dei sistemi Early Warning è la loro integrazione con le opere di stabilizzazione. Anche quando vengono realizzate gallerie drenanti, dreni profondi o altre opere di consolidamento, il monitoraggio continua a svolgere un ruolo essenziale. Le misure raccolte consentono infatti di verificare nel tempo l'efficacia degli interventi, controllare l'evoluzione del regime piezometrico e individuare tempestivamente eventuali variazioni delle condizioni di stabilità. In questo senso il sistema di allerta diventa uno strumento indispensabile per la gestione a lungo termine del versante.

Numerosi casi internazionali dimostrano l'importanza di questo approccio integrato. Nelle Alpi europee, in Giappone, negli Stati Uniti e a Hong Kong, molti grandi movimenti franosi sono oggi controllati mediante reti di monitoraggio permanenti che operano in stretta connessione con sistemi di drenaggio profondo. In alcuni casi, la combinazione tra opere di stabilizzazione e sistemi di allerta ha consentito di ridurre significativamente il rischio per le popolazioni e le infrastrutture, garantendo al tempo stesso una migliore comprensione dei processi che governano il comportamento delle frane.

In conclusione, i sistemi di allerta precoce rappresentano oggi una componente fondamentale della moderna gestione del rischio franoso. Essi non sostituiscono gli interventi di stabilizzazione, ma ne costituiscono un complemento indispensabile, permettendo di monitorare continuamente il comportamento del versante, verificare l'efficacia delle opere realizzate e fornire un supporto decisionale tempestivo in caso di evoluzione critica del fenomeno. In un contesto caratterizzato da cambiamenti climatici e da una crescente pressione antropica sui territori montani e collinari, l'integrazione tra monitoraggio avanzato, modellazione geotecnica e opere di drenaggio rappresenta una delle strategie più efficaci per la mitigazione del rischio associato alle grandi frane profonde.

4.6 Gallerie per interventi di consolidamento

Talvolta il semplice drenaggio non è sufficiente. Può essere necessario intervenire direttamente sulle zone di debolezza del versante. La galleria permette di raggiungere aree che dalla superficie sarebbero praticamente inaccessibili.

Attraverso la galleria si possono realizzare:

- iniezioni cementizie;
- iniezioni chimiche;
- trattamenti di permeazione;
- consolidamenti localizzati.

Lo scopo può essere sia strutturale sia idraulico.

In alcuni progetti vengono installati:

- ancoraggi passivi;
- ancoraggi attivi;
- barre autoperforanti;
- sistemi di rinforzo profondo.

La galleria offre una piattaforma stabile dalla quale eseguire tali interventi.

4.7 Gallerie strutturali con funzione resistente

Accanto alle tradizionali gallerie drenanti, progettate principalmente per ridurre le pressioni interstiziali e controllare la circolazione delle acque sotterranee, esiste una particolare categoria di opere sotterranee che svolge anche una funzione direttamente strutturale nella stabilizzazione dei versanti. Si tratta delle **gallerie strutturali con funzione resistente**, opere concepite non solo per modificare il regime idrogeologico del pendio, ma anche per contribuire attivamente all'equilibrio meccanico della massa instabile.

Questa tipologia di intervento trova applicazione soprattutto nei casi in cui il versante sia interessato da fenomeni gravitativi di grandi dimensioni, caratterizzati da superfici di scorrimento profonde e da movimenti che non possono essere efficacemente contrastati attraverso il solo drenaggio. In tali situazioni, infatti, la riduzione delle pressioni interstiziali può risultare necessaria ma non sempre sufficiente a garantire un adeguato incremento del coefficiente di sicurezza. Diventa quindi opportuno associare all'effetto drenante una vera e propria azione resistente esercitata dall'opera sotterranea.

Dal punto di vista geotecnico, queste gallerie possono essere assimilate a grandi elementi strutturali inseriti all'interno del versante. A differenza delle semplici gallerie drenanti, che sono generalmente progettate per minimizzare le interazioni meccaniche con il terreno circostante, le gallerie strutturali vengono dimensionate affinché possano assorbire e trasferire parte delle sollecitazioni generate dal movimento della massa instabile.

Il principio di funzionamento può essere compreso immaginando la galleria come una struttura rigida o semirigida capace di opporsi alle deformazioni del terreno. Quando il versante tende a muoversi verso valle, una parte delle spinte viene intercettata dal rivestimento della galleria e trasferita alle zone più stabili del sottosuolo. L'opera contribuisce così ad aumentare la resistenza complessiva del sistema, analogamente a quanto avviene con una paratia profonda o con un'opera di sostegno tradizionale, ma con il vantaggio di operare direttamente all'interno del corpo della frana.

L'efficacia di questo meccanismo dipende fortemente dalla posizione della galleria rispetto alla superficie di scorrimento. Nella maggior parte dei casi l'opera viene collocata in prossimità della base della massa instabile oppure in corrispondenza delle zone in cui si concentrano le maggiori deformazioni. In questo modo la struttura può intercettare una quota significativa delle spinte gravitazionali che tendono a provocare il movimento del versante.

Dal punto di vista costruttivo, le gallerie strutturali richiedono generalmente rivestimenti più robusti rispetto a quelli impiegati nelle gallerie drenanti tradizionali. Il rivestimento può essere realizzato mediante calcestruzzo armato, centine metalliche, conci prefabbricati o sistemi misti, progettati per resistere alle elevate sollecitazioni esercitate dal terreno. In alcuni casi vengono inoltre utilizzati tiranti, ancoraggi profondi o elementi di rinforzo integrati che consentono di migliorare ulteriormente la capacità resistente dell'opera.

Un aspetto particolarmente interessante è rappresentato dalla possibilità di combinare la funzione strutturale con quella drenante. Molte gallerie moderne sono infatti progettate come sistemi multifunzionali capaci di svolgere contemporaneamente entrambe le funzioni. Da un lato l'opera intercetta e convoglia le acque sotterranee, riducendo le pressioni interstiziali; dall'altro contribuisce direttamente alla stabilità meccanica del versante attraverso la propria rigidità strutturale. Questa doppia azione può risultare particolarmente efficace nelle grandi frane profonde, dove il miglioramento delle condizioni di equilibrio richiede spesso l'intervento simultaneo su più fattori destabilizzanti.

Le gallerie strutturali con funzione resistente sono state impiegate in diversi contesti internazionali, soprattutto in aree montane caratterizzate da grandi deformazioni gravitativo-profonde. In Giappone, Svizzera e Austria, ad esempio, alcune opere sono state progettate per svolgere sia il ruolo di drenaggio sia quello di consolidamento strutturale, contribuendo alla protezione di infrastrutture strategiche quali linee ferroviarie, strade di montagna e insediamenti urbani. In questi casi il monitoraggio a lungo termine ha evidenziato una significativa riduzione delle deformazioni e un miglioramento delle condizioni di stabilità globale.

Dal punto di vista progettuale, la realizzazione di una galleria strutturale richiede una conoscenza estremamente approfondita delle caratteristiche geologiche, geotecniche e idrogeologiche del versante. È infatti necessario valutare con precisione la geometria della superficie di scorrimento, l'entità delle spinte agenti sull'opera, le caratteristiche deformative dei materiali coinvolti e le possibili interazioni tra la struttura e la massa instabile. Per questo motivo tali interventi sono generalmente preceduti da campagne di indagine particolarmente dettagliate e da modellazioni numeriche avanzate.

In conclusione, le gallerie strutturali con funzione resistente rappresentano una delle soluzioni più sofisticate nell'ambito della stabilizzazione dei versanti. Pur essendo meno diffuse rispetto alle gallerie drenanti tradizionali, esse offrono la possibilità di combinare il controllo delle acque sotterranee con un contributo diretto alla resistenza meccanica del pendio. Quando correttamente progettate e inserite in una strategia integrata di mitigazione del rischio, queste opere possono fornire un contributo determinante alla stabilizzazione di grandi frane profonde e alla protezione delle infrastrutture e delle comunità esposte ai fenomeni di instabilità gravitativa.

4.8 Gallerie drenanti con dreni radiali

Negli ultimi decenni si è diffusa una configurazione particolarmente efficace: la galleria drenante associata a dreni radiali.

Da un punto di vista operativo, la galleria funge da collettore centrale mentre decine o centinaia di perforazioni drenanti si sviluppano radialmente verso le zone più permeabili e maggiormente pressurizzate. Osservando il sistema in pianta, i drenaggi appaiono disposti come le stecche di un ventaglio.

Questa configurazione consente di:

- aumentare enormemente il volume drenato;
- raggiungere acquiferi profondi;
- intercettare vie preferenziali di flusso.

L'efficienza del sistema risulta molto superiore rispetto a quella di una semplice galleria non perforata.

Questa impostazione riduce i costi complessivi, permettere interventi di consolidamento futuri e migliora la gestione dell'opera nel lungo periodo.

5. Caso studio: la stabilizzazione della frana di Po Shan (Hong Kong)

5.1 Introduzione

La stabilizzazione del versante di Po Shan rappresenta uno dei casi più interessanti di applicazione dell'ingegneria geotecnica moderna in ambiente urbano. Hong Kong è caratterizzata da una combinazione particolarmente sfavorevole di fattori naturali: rilievi montuosi molto ripidi, elevata densità abitativa, precipitazioni estremamente abbondanti e una geologia che favorisce la formazione di spesse coltri di alterazione superficiale. In questo contesto, il rischio di frana costituisce da sempre una delle principali problematiche per la sicurezza del territorio.

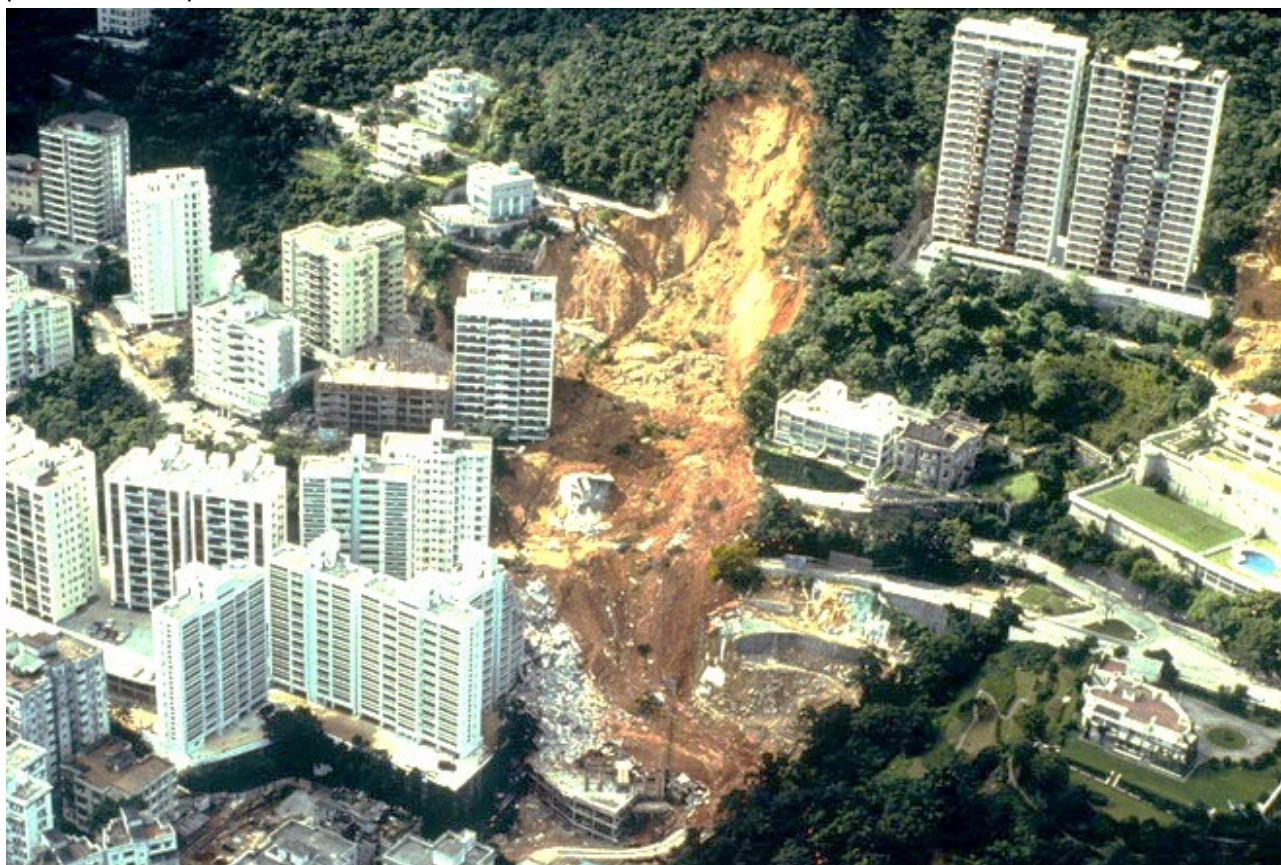


Figura 6 – Immagine della frana di Po Shan a Hong Kong del 18 Giugno 1972 – Image from “Briefing Notes” by Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department of Hong Kong, October 2011.

Il caso di Po Shan assume particolare rilevanza perché dimostra come, in molti grandi versanti instabili, il controllo delle acque sotterranee possa risultare più efficace rispetto a interventi strutturali massicci. L'intervento realizzato non si è limitato a contrastare meccanicamente il movimento della massa in frana, ma ha puntato a modificare le condizioni idrogeologiche che alimentavano il dissesto. Attraverso la costruzione di gallerie drenanti e di una complessa rete di dreni verticali e sub-verticali, è stato possibile ridurre in maniera significativa le pressioni interstiziali all'interno del versante e riportare il sistema verso condizioni di maggiore stabilità.

5.2 Il contesto geografico e geologico

L'area di Po Shan si trova sul versante nord-occidentale dell'isola di Hong Kong, in una zona dove lo sviluppo urbano si è progressivamente esteso fino a occupare aree caratterizzate da una morfologia particolarmente

accidentata. I versanti presentano pendenze elevate e si innalzano rapidamente al di sopra delle aree residenziali e delle infrastrutture sottostanti.

Dal punto di vista geologico, il substrato è costituito prevalentemente da rocce granitiche che, nel corso di milioni di anni, sono state sottoposte a intensi processi di alterazione chimica favoriti dal clima caldo e umido della regione. Questo processo ha trasformato la porzione superficiale della roccia in terreni residuali di spessore considerevole, talvolta superiori a diverse decine di metri.

Tali materiali conservano in parte la struttura originaria della roccia madre ma possiedono caratteristiche meccaniche molto diverse. La loro permeabilità è variabile e spesso la circolazione delle acque sotterranee avviene lungo superfici di contatto tra zone con differente grado di alterazione o lungo sistemi di fratture ereditati dalla roccia originaria.

Le precipitazioni rappresentano un elemento fondamentale del quadro geologico. Hong Kong riceve mediamente oltre due metri di pioggia all'anno, concentrati soprattutto durante la stagione dei monsoni e dei tifoni. In occasione degli eventi meteorici più intensi, enormi quantità d'acqua si infiltrano nel sottosuolo, alimentando la falda e aumentando le pressioni idrauliche all'interno dei versanti.

5.3 La natura dell'instabilità

Gli studi condotti a Po Shan evidenziarono che il fenomeno non era riconducibile a una semplice frana superficiale, bensì a una complessa instabilità profonda controllata principalmente dalle condizioni idrogeologiche interne.

Le indagini geotecniche e geologiche misero in luce l'esistenza di una massa di terreno alterato che tendeva lentamente a deformarsi sotto l'azione della gravità. Sebbene il movimento fosse generalmente lento, il versante mostrava una marcata sensibilità alle variazioni del contenuto d'acqua e alle oscillazioni del livello piezometrico.

Uno degli aspetti più significativi emersi dai monitoraggi fu la stretta correlazione tra precipitazioni e deformazioni del versante. Dopo periodi particolarmente piovosi si osservavano incrementi delle pressioni interstiziali e contemporaneamente un'accelerazione degli spostamenti registrati dagli strumenti installati nel sottosuolo. Questo comportamento indicava chiaramente che l'acqua non rappresentava un semplice elemento accessorio, ma il principale fattore responsabile della perdita di stabilità.

La situazione era ulteriormente aggravata dal fatto che la presenza di edifici e infrastrutture nella zona sottostante imponeva standard di sicurezza particolarmente elevati. Non era quindi sufficiente rallentare il movimento della frana: era necessario ottenere una riduzione significativa del rischio nel lungo periodo.

5.4 La scelta del drenaggio come strategia di stabilizzazione

Le analisi preliminari mostrarono che le dimensioni della massa instabile e la profondità delle superfici di scorrimento rendevano poco efficace un approccio basato esclusivamente su opere di sostegno tradizionali. Interventi come muri, paratie o sistemi di contenimento superficiale avrebbero richiesto dimensioni eccezionali e costi estremamente elevati.

I progettisti compresero che la vera causa dell'instabilità risiedeva nel comportamento dell'acqua all'interno del versante. Di conseguenza la strategia scelta fu quella di intervenire direttamente sul sistema idrogeologico.

L'obiettivo non era trattenere la massa in movimento mediante una struttura resistente, ma ridurre le pressioni dell'acqua che diminuivano la resistenza del terreno. Questo approccio si basa su uno dei principi fondamentali della geotecnica moderna: nelle grandi frane profonde è spesso più efficace eliminare le cause dell'instabilità piuttosto che contrastarne gli effetti.

Attraverso il drenaggio si puntava ad abbassare la falda, ridurre le sovrappressioni presenti nelle zone più critiche e aumentare la tensione efficace all'interno dei materiali. In altre parole, si cercava di restituire al terreno parte della resistenza meccanica che aveva perso a causa della presenza dell'acqua.

5.5 La realizzazione delle gallerie drenanti

Il cuore dell'intervento fu costituito da un sistema di gallerie scavate all'interno del versante. La loro posizione non venne scelta casualmente, ma fu definita sulla base di un'approfondita ricostruzione del modello idrogeologico dell'area.

Le gallerie vennero progettate per intercettare le principali vie di circolazione delle acque sotterranee e per collocarsi al di sotto delle zone caratterizzate dalle maggiori pressioni piezometriche. Una volta completate, esse si comportavano come vere e proprie linee drenanti permanenti.

Dal punto di vista idraulico, la galleria rappresentava una zona a pressione atmosferica verso la quale l'acqua tendeva naturalmente a fluire. Questo semplice principio fisico consentiva di innescare un drenaggio continuo senza necessità di sistemi di pompaggio permanenti.

Con il passare del tempo, attorno alle gallerie si sviluppò una vasta area di influenza nella quale il livello piezometrico iniziò progressivamente ad abbassarsi. L'effetto non riguardava soltanto il volume immediatamente circostante lo scavo, ma si estendeva a porzioni molto più ampie del versante.

5.6 Il ruolo dei dreni verticali e sub-verticali

L'aspetto più innovativo dell'intervento fu probabilmente l'integrazione delle gallerie con una rete di perforazioni drenanti orientate verso l'alto.

I progettisti erano consapevoli che una galleria, da sola, avrebbe avuto una capacità limitata di influenzare le zone più lontane e profonde del versante. Per aumentare il volume drenato vennero quindi realizzati numerosi dreni verticali e sub-verticali che partivano dalle gallerie e si sviluppavano verso le porzioni superiori della massa instabile.

Queste perforazioni funzionavano come canali preferenziali per il deflusso dell'acqua. Le zone caratterizzate da elevate pressioni interstiziali potevano così scaricare l'acqua direttamente verso la galleria, che svolgeva il ruolo di collettore principale.

Dal punto di vista concettuale, il sistema può essere immaginato come un albero sotterraneo: la galleria rappresentava il tronco principale, mentre i dreni costituivano una rete di rami che si estendevano all'interno del versante intercettando le aree maggiormente sature.

Grazie a questa configurazione fu possibile aumentare enormemente l'efficienza del drenaggio senza dover realizzare ulteriori grandi opere di scavo.

5.7 Il funzionamento nel lungo periodo

Una delle caratteristiche più importanti degli interventi drenanti è che i loro effetti si sviluppano gradualmente nel tempo.

Subito dopo la realizzazione delle opere si osservò un primo drenaggio delle zone direttamente intercettate. Tuttavia, il vero beneficio si manifestò nei mesi e negli anni successivi, quando l'intero sistema idrogeologico iniziò a riorganizzarsi.

L'acqua accumulata all'interno del versante trovò progressivamente nuove vie di deflusso verso la rete drenante. Le pressioni interstiziali diminuirono e il livello piezometrico si abbassò in modo diffuso.

Si instaurò così una nuova condizione di equilibrio caratterizzata da una minore presenza di acqua nelle zone più sensibili dal punto di vista geotecnico.

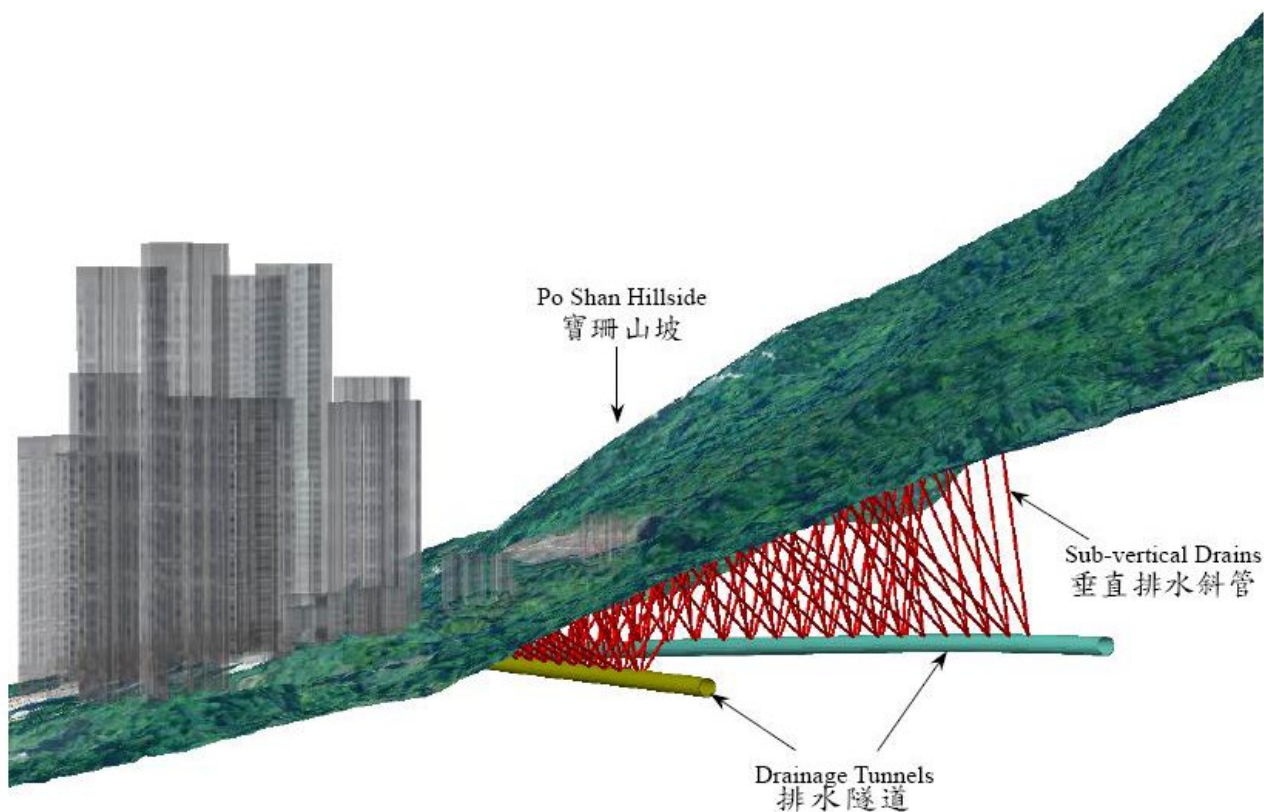


Figura 7 – Foto rendering dei tunnel drenanti scavati all'interno del versante. Da notare la disposizione sub vertical dei dreni. Rendering by CEDD Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department of Hong Kong.

5.8 I risultati ottenuti

Il sistema di monitoraggio installato a Po Shan fornì una documentazione estremamente dettagliata dell'efficacia dell'intervento.

Le misure piezometriche mostrarono una riduzione significativa delle pressioni interne al versante.

Parallelamente, gli strumenti geotecnici registrarono una diminuzione delle deformazioni e una progressiva riduzione delle velocità di movimento.

Ciò che rese particolarmente significativo questo risultato fu il fatto che il miglioramento non derivava da una resistenza artificiale introdotta dall'uomo, ma da una modifica permanente delle condizioni naturali che controllavano la stabilità del pendio.

L'abbassamento della falda comportò infatti un aumento della tensione efficace, un incremento della resistenza al taglio dei materiali e una riduzione delle forze destabilizzanti associate alle pressioni dell'acqua.

5.9 Significato del caso Po Shan per l'ingegneria geotecnica

Il caso di Po Shan è oggi considerato uno degli esempi più rappresentativi di stabilizzazione di un grande versante mediante drenaggio profondo.

La sua importanza risiede nel fatto che dimostra come l'acqua possa essere il vero motore dell'instabilità e come il controllo del regime idrogeologico possa produrre effetti molto più rilevanti di quelli ottenibili attraverso opere strutturali convenzionali.

L'intervento ha confermato un principio ormai ampiamente accettato nella pratica geotecnica internazionale: quando una frana è controllata principalmente dalle pressioni interstiziali, la riduzione di tali pressioni può



Figura 8 – Vista interna delle gallerie drenanti di Po Shan. A sinistra i drenaggi subverticali installati all'interno del tunnel con rivestimento permanente in calcestruzzo. A Destra il punto di snodo delle 2 gallerie drenanti: a sx la galleria che si snoda nella parte alta del versante mentre, a dx la galleria bassa. Images from "Briefing Notes" by Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department of Hong Kong, October 2011.

generare incrementi della stabilità equivalenti a quelli che si otterrebbero con strutture di sostegno enormemente più costose e complesse.

Per questo motivo il progetto di Po Shan continua ancora oggi a essere citato nella letteratura tecnica come uno dei migliori esempi di applicazione delle gallerie drenanti e dei dreni profondi nella gestione delle grandi instabilità di versante.

6. Conclusioni

L'analisi sviluppata nel presente lavoro evidenzia come la stabilizzazione delle grandi frane profonde richieda un approccio multidisciplinare capace di integrare conoscenze geologiche, geotecniche e idrogeologiche. Tra i numerosi fattori che influenzano l'evoluzione dei fenomeni franosi, l'acqua emerge come l'elemento di controllo più importante, poiché agisce direttamente sui meccanismi che regolano l'equilibrio del versante. L'innalzamento della falda, l'aumento delle pressioni interstiziali e la conseguente riduzione delle tensioni efficaci possono infatti determinare una significativa diminuzione della resistenza al taglio dei terreni, favorendo l'innescò o la riattivazione di movimenti gravitativi anche in versanti apparentemente stabili.

In questo contesto, le gallerie drenanti e le gallerie di alleggerimento rappresentano uno degli strumenti più efficaci a disposizione dell'ingegneria geotecnica moderna per la mitigazione del rischio franoso. A differenza delle opere di sostegno tradizionali, che agiscono prevalentemente contrastando gli effetti del dissesto, queste opere intervengono direttamente sulle cause dell'instabilità, modificando il regime idrogeologico interno del versante e favorendo il ripristino di condizioni di equilibrio più favorevoli. L'abbassamento della falda e la riduzione delle pressioni interstiziali consentono infatti di incrementare la resistenza meccanica dei materiali e di migliorare il fattore di sicurezza del pendio in modo spesso più efficace e duraturo rispetto a interventi esclusivamente strutturali.

L'evoluzione delle tecniche progettuali ha inoltre portato allo sviluppo di sistemi sempre più sofisticati, nei quali gallerie drenanti, dreni radiali, perforazioni sub-orizzontali, pozzi drenanti e, in alcuni casi, gallerie con funzione resistente operano in maniera integrata. Tale approccio consente di estendere il volume di terreno interessato dal drenaggio, intercettare le principali vie di circolazione delle acque sotterranee e garantire un controllo più efficace delle condizioni piezometriche anche nei versanti caratterizzati da geometrie complesse e da superfici di scorrimento profonde.

Particolarmente significativo, sotto questo profilo, è il caso della frana di Po Shan a Hong Kong, che costituisce uno dei più importanti esempi internazionali di stabilizzazione mediante drenaggio profondo. L'esperienza maturata in questo intervento ha dimostrato come una corretta comprensione del modello idrogeologico del versante e l'impiego combinato di gallerie drenanti e dreni verticali possano produrre una sensibile riduzione delle pressioni interstiziali e delle deformazioni, migliorando in maniera sostanziale la stabilità della massa in frana. Il caso Po Shan conferma un principio oggi ampiamente condiviso nella comunità geotecnica internazionale: nelle grandi frane controllate dall'acqua, il drenaggio profondo rappresenta spesso la soluzione più razionale, sostenibile ed efficace dal punto di vista tecnico ed economico.

Infine, l'esperienza maturata a livello internazionale evidenzia come il successo degli interventi non dipenda esclusivamente dalla realizzazione delle opere, ma anche dalla capacità di monitorarne nel tempo gli effetti attraverso reti di controllo geotecnico e sistemi di allerta precoce. La crescente disponibilità di tecnologie di monitoraggio in tempo reale, unita allo sviluppo di modelli numerici sempre più avanzati, consente oggi di affrontare la gestione delle grandi instabilità di versante con un livello di conoscenza e di affidabilità impensabile fino a pochi decenni fa.

In conclusione, le gallerie drenanti e di alleggerimento rappresentano una delle espressioni più avanzate dell'ingegneria geotecnica applicata alla stabilizzazione dei versanti. La loro capacità di intervenire direttamente sui meccanismi che governano l'instabilità, anziché limitarne gli effetti, le rende uno strumento strategico nella gestione del rischio franoso. In un contesto caratterizzato da cambiamenti climatici, eventi meteorologici sempre più intensi e crescente pressione antropica sui territori montani e collinari, il controllo delle acque sotterranee attraverso opere di drenaggio profondo continuerà a rappresentare una delle soluzioni più efficaci e sostenibili per la protezione del territorio e delle infrastrutture.

Bibliografia

1. **Chiarelli, M., (2025).** Innovazioni tecnologiche nella stabilizzazione dei pendii: modelli costitutivi e simulazioni numeriche - INGENIO del 01 Luglio 2025, Imready Srl – RSM.
2. **Chiarelli, M., (2025).** L'impiego della geofisica e del remote sensing nel monitoraggio dei fenomeni franosi: stato dell'arte, sviluppi recenti e prospettive future - INGENIO del 18 Settembre 2025, Imready Srl – RSM.
3. **Chiarelli, M., (2026).** Reliability – Based Design in Large Geotechnical Structures: Applications to Tunnel Linings and Retaining Systems – INGENIO del 19 Marzo 2026, Imready Srl – RSM.
4. **Chiarelli, M., (2021).** Cedimenti differenziali del terreno di fondazione e danni agli edifici – INGENIO web del 21 Aprile 2021, Imready Srl – RSM.
5. **Chiarelli, M., (2009).** L'Arte del costruire gallerie – Editrice | Uni Service, Trento, 2009 ISBN: 978-88-6178-323-2.
6. Guerricchio, A., **Chiarelli, M., et al., (2006).** High precision GPS monitoring of landslides. Geophysical Research Abstracts, Vol. 8, 10225, 2006.
7. **Chiarelli, M., (2004).** Il monitoraggio satellitare G.P.S. di elevata precisione applicato alle Deformazioni Gravitative Profonde di Versante ed alle Grandi Frane – Atti del convegno "Tecnologie di intervento nelle aree in frana" – Maggio 2004 Dipartimento di Scienze Ambientali UNICAM (MC).
8. **Chiarelli, M., (2009).** L'attraversamento di aree in frana con rilevati stradali e ferroviari super leggeri – "Strade & Autostrade" n°78, EDI-CEM Srl – MI.

9. **Chiarelli, M., (2013).** Deformazioni Gravitative Profonde di Versante e Grandi Frane: i comuni di Falerna e Gizzeria (Catanzaro) – “INGENIO” n°17, Imready Srl – RSM.
10. **Chiarelli, M., (2016).** L’ingegneria geotecnica e la geologia al servizio delle grandi opere e per la difesa del territorio dai rischi naturali – “INGENIO web” DOSSIER DISSESTO IDROGEOLOGICO E OPERE GEOTECNICHE – Ottobre 2016, Imready Srl – RSM.
11. **Chiarelli, M., (2018).** Infilaggi di rinforzo del terreno in galleria – “Strade & Autostrade” n°131, EDI-CEM Srl – MI.
12. Guerricchio, A. (2022). Convivere con i grandi movimenti di massa. Rivista Italiana di Geotecnica Anno LVI, n. 3-4, Luglio-Dicembre 2022.
13. “Briefing Notes” by Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department of Hong Kong, October 2011.
14. Hutchinson, J.N. (1977). Assessment of the Effectiveness of Corrective Measures in Relation to Geological Conditions and Types of Slope Movement. Published in Bull. IAEG N° 16, 131-155, 1977.
15. Schuster, R.L. (1985). Stabilizing Unstable Slopes by Drainage. In: Transportation Research Record, No. 1031, Transportation Research Board, Washington D.C., pp. 54–63.
16. J. Michael Duncan, Stephen G. Wright, Thomas L. Brandon (2014 ed. Dic. 2023). Soil Strength and Slope Stability – Wiley - ISBN 978-1-118-65165-0.