

CAPITOLO II

I TIRANTI COME TECNICA PER L'ANCORAGGIO DI STRUTTURE NELLA STABILIZZAZIONE DI VERSANTI

3.1 GENERALITÀ

Il presente capitolo fa riferimento al testo "Recommendations for the Design, Calculation, Construction and Monitoring of Ground Anchorages" (A.A. Balkema, 1989).

Oggigiorno le tecniche di ancoraggio sono in una fase di grande sviluppo. È stato infatti dimostrato come in numerosi casi essi possano offrire una soluzione ai problemi di stabilità a diverse profondità o come essi siano ottimi sistemi di ancoraggio di fondazioni soggette ad elevate pressioni idrostatiche.

Gli ancoraggi correntemente impiegati sono raggruppati nelle seguenti tre categorie:

- Chiodi di ancoraggio;
- Bulloni di ancoraggio;
- Tiranti di ancoraggio.

In Figura 1e 2 sono mostrati gli schemi strutturali delle tre tipologie di ancoraggi sopra elencati.

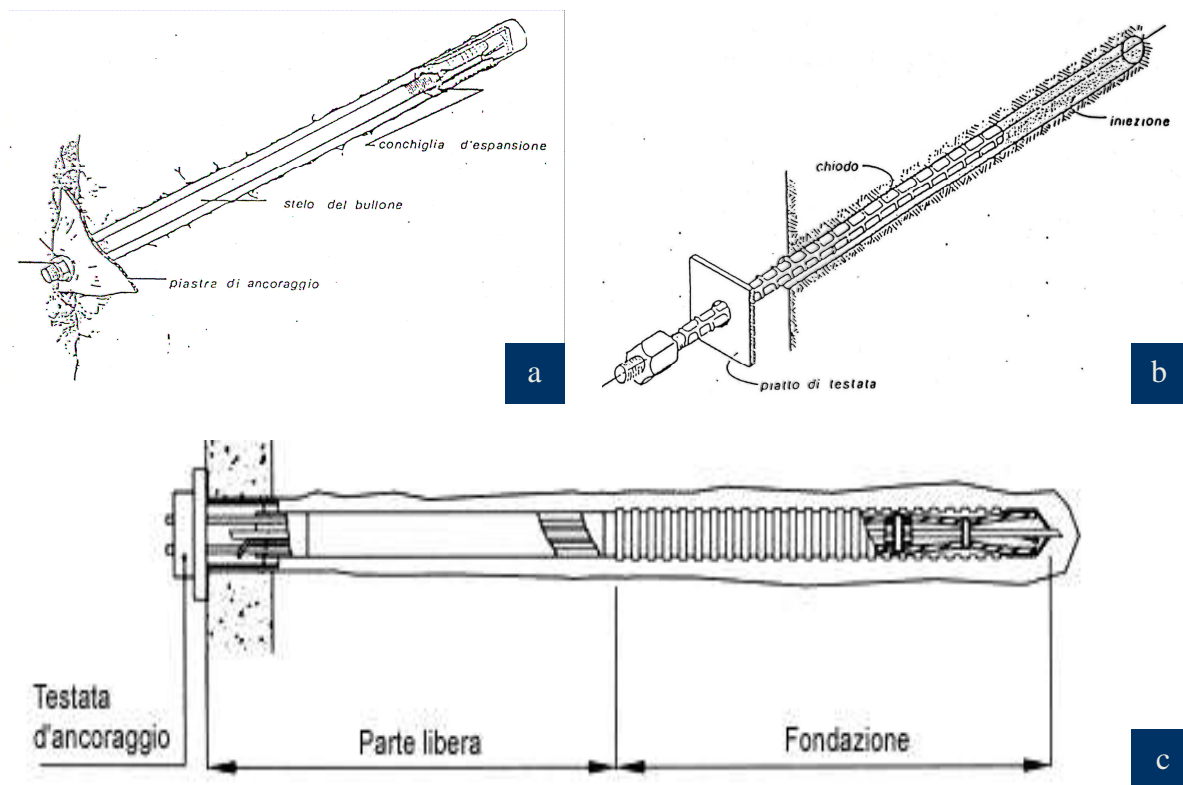


Figura 1
Tipologie d'ancoraggi. a) chiodo; b) bullone; c) tirante.
(da Rodino, 2008)

L'ancoraggio al terreno avviene attraverso l'impiego di malte cementizie con additivi antiritiro, ovvero con resine, o con dispositivi meccanici che modificano la loro geometria mediante una operazione di avvitaamento.

I tiranti d'ancoraggio vengono suddivisi in due categorie, in funzione dei loro propositi finali:

- *ancoraggi temporanei*: hanno solo un ruolo provvisorio e diventano superflui oltre una certa fase di realizzazione dell'opera;
- *ancoraggi permanenti*: assicurano la stabilità per tutta la vita della struttura.

In base alla tensione iniziale possono essere classificati in:

- *presollecitati*: tiranti nella cui armatura viene indotta una forza di tesatura superiore a quella teorica di utilizzazione;
- *parzialmente presollecitati*: nell'armatura viene indotta una forza di tesatura minore o uguale a quella teorica di utilizzazione;
- *non presollecitati*: nell'armatura del tirante non viene indotta alcuna forza di tesatura.

In base alla possibilità di controllo delle variazioni di tensione si possono, invece, suddividere in:

- *normali*: tiranti in cui viene stabilita la tensione di esercizio (*forza di tesatura*) e viene esclusa la possibilità di riprese di tesatura; la forza di tesatura viene fissata al termine della fase detta *iniziale*, di durata da stabilire di volta in volta in sede di progetto;
- *ritensionabili*: tiranti per i quali esiste, anche dopo la fase iniziale, la possibilità di modificare, sia in aumento che in diminuzione, la forza di tesatura.

I tiranti vengono inoltre suddivisi in base al dispositivo di bloccaggio: se questo è unico per tutti gli elementi costituenti l'armatura, oppure se è multiplo, cioè uno per ciascun elemento costituente l'armatura.

Altra importante classificazione avviene in base alla lavorazione dell'acciaio armonico impiegato per l'armatura:

- *a barre*;
- *a fili*;
- *a trefoli*;

in base alla guaina che avvolge la parte libera:

- *semplice*: una sola guaina per tutti gli elementi costituenti l'armatura;
- *multiplo*: una guaina per ciascun elemento dell'armatura;
- *composta*: una guaina per ciascun elemento, più una guaina per l'insieme degli elementi costituenti l'armatura;

e in base alla guaina che avvolge la fondazione:

- *senza guaina*;
- *con guaina* (detta anche "fondazione protetta").

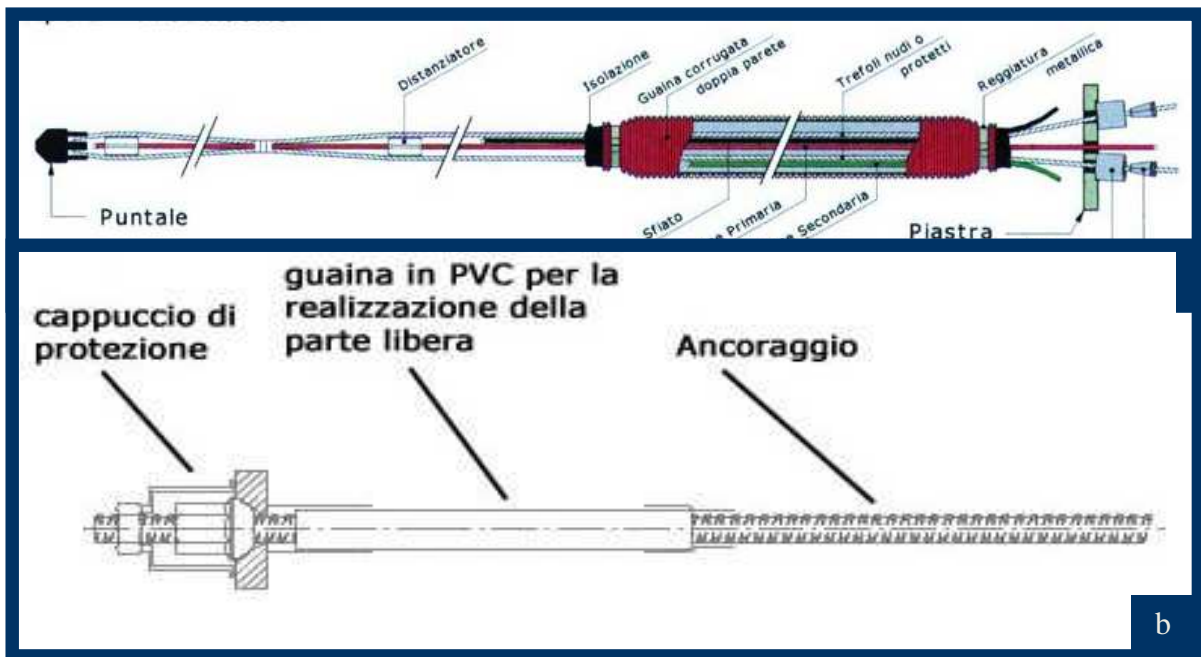


Figura2

Esempi di tiranti.

a) tirante a trefoli; b) tirante a barra;

c) particolare dei dispositivi di bloccaggio dei trefoli.

Un' ulteriore suddivisione viene eseguita in base alla realizzazione del dispositivo di ancoraggio:

- *ancoraggio per cementazione*: può essere ulteriormente distinto in relazione alla forma del foro di alloggiamento, al tipo di legame, alla modalità di iniezione dei leganti, ecc.;
- *ancoraggio ad espansione metallica*: utilizzabile solo per tiranti provvisori.

Tra le tipologie elencate gli ancoraggi più comuni sono quelli che comprendono una pretensione dell'elemento in tensione tramite malta cementizia.

I tiranti contribuiscono alla stabilità delle strutture. Molte costruzioni, specialmente in grandi città, sono progettate con molti piani seminterrati, necessitando così di scavi a grandi profondità, che spesso sono portati avanti tramite due principali tecniche: i diaframmi, usando del fango bentonitico e il metodo delle berlinesi, che consistono nella posa in opera di elementi di irrigidimento. La stabilità dello scavo richiede la posa di ancoraggi a diversi livelli, specialmente in fase temporanea e nel caso in cui gli scavi proseguano sotto il livello della falda: in quest'ultimo caso infatti le fondazioni progettate devono resistere al sollevamento dovuto alla pressione idrostatica, perciò vengono fissate attraverso dei tiranti permanenti assicurando così l'equilibrio.

Generalmente tutti questi tiranti sono presollecitati al fine di ridurre successive deformazioni.

Altro importante impiego dei tiranti si ritrova nel consolidamento di pareti di scavo o di paratie, come nell'esempio mostrato in figura 3.

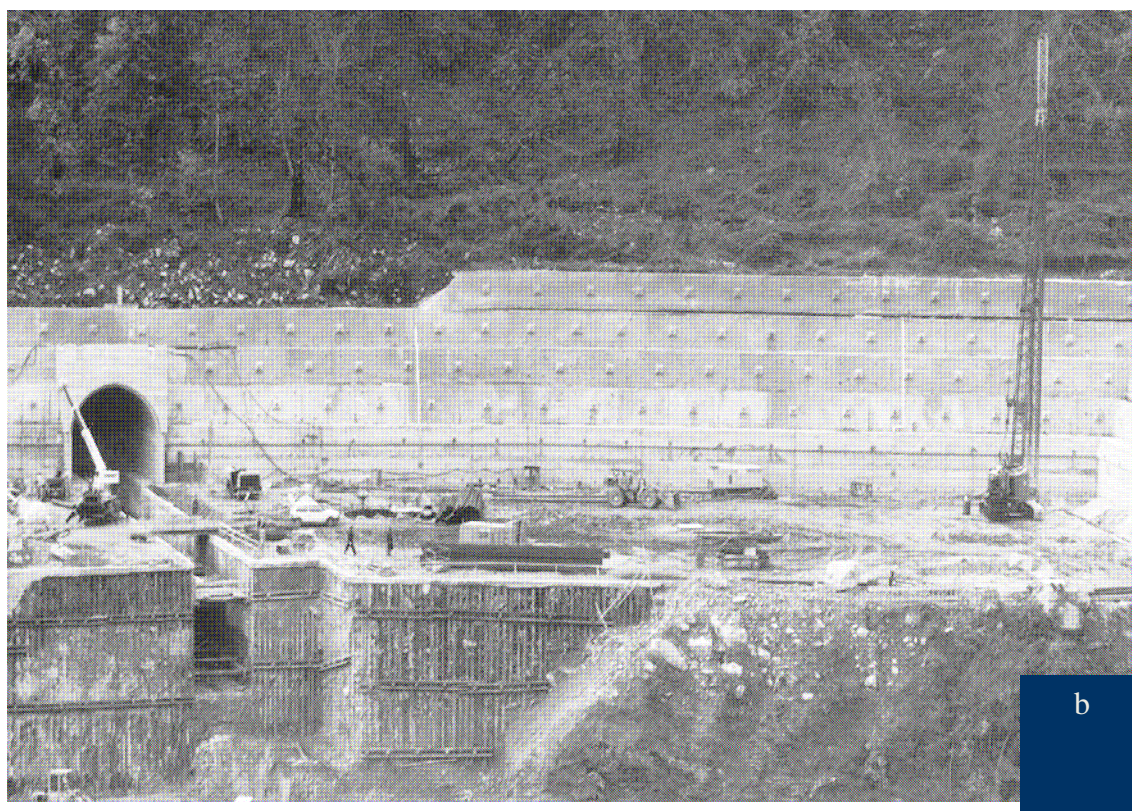
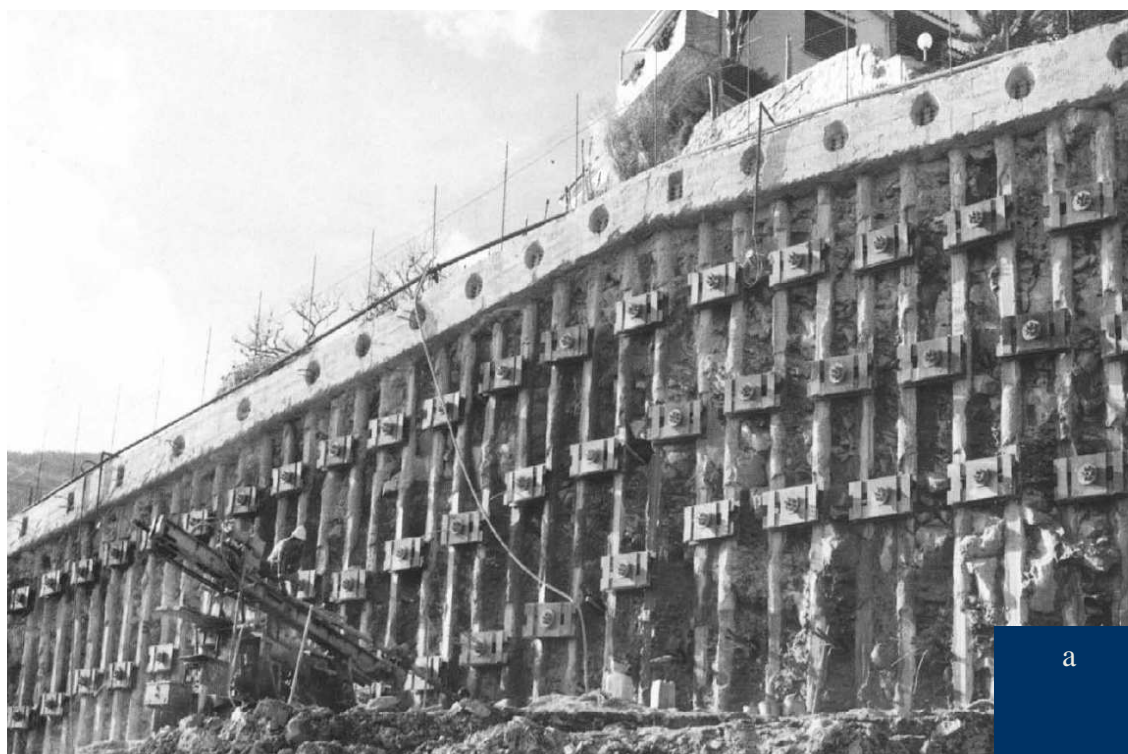


Figura3
Esempi d'applicazione di tiranti d'ancoraggio.
a) consolidamento di una parete di scavo; b) sostegno di una paratia.

Nella progettazione di tiranti, il processo di studio potrebbe essere organizzato come mostrato nelle seguenti sequenze.

1- Muri di contenimento:

- determinazione dei carichi agenti sui muri di contenimento;
- scelta dei livelli d'ancoraggio e successive fasi d'installazione;
- determinazione delle reazioni che devono essere controllate dal tirante durante le varie fasi d'installazione;
- verifica della capacità di resistenza del tirante;
- verifica della stabilità generale.

2- Progetto di tiranti d'ancoraggio:

- scelta del tipo d'ancoraggio in relazione a: vita d'esercizio del tirante, agenti aggressivi presenti nel terreno, capacità richiesta, metodo di perforazione usato, etc;
- determinazione dell'armatura in relazione al carico d'esercizio;
- scelta del metodo costruttivo e tipo di protezione.

Non va dimenticato che a monte delle operazioni di progettazione devono essere effettuate delle indagini indirizzate a raccogliere tutti i dati qualitativi e quantitativi necessari per il progetto di ancoraggio e per la verifica della stabilità globale.

La valutazione del più appropriato metodo di trattenuta delle strutture dovrebbe essere eseguito prima della progettazione specifica dei tiranti di ancoraggio, anche attraverso prove di messa in tensione.

Nel caso si decida di utilizzare dei tiranti d'ancoraggio, per realizzare un'adeguata e corretta progettazione, occorre prendere in considerazione le prove sul terreno precedentemente effettuate.

A questo riguardo devono essere svolte delle indagini mirate a definire il modello geologico e geotecnico del sottosuolo interessato dal complesso di opere, con particolare riguardo alla suddivisione del sottosuolo in zone progettualmente omogenee e al riconoscimento dell'ambiente nel quale devono essere realizzati gli ancoraggi (che potrebbe rivelarsi chimicamente aggressivo nei riguardi degli elementi costitutivi degli stessi).

Queste analisi vanno condotte su quelle parti di sottosuolo che verranno influenzate, direttamente o indirettamente, dalla realizzazione degli ancoraggi e dall'eventuale struttura ancorata o che influenzeranno il loro comportamento.

Il tirante è composto da tre principali parti funzionali (figura 4):

- *Testata*: insieme dei dispositivi atti a conferire alla struttura ancorata, o direttamente alla roccia, la forza di trazione impressa al tirante;
- *Fondazione*: insieme degli elementi atti a trasmettere al substrato di ancoraggio (terreno o roccia) le forze di trazione del tirante;
- *Parte libera*: insieme degli elementi di collegamento, atti a trasmettere la forza di trazione dalla testata alla fondazione.

Gli elementi costruttivi fondamentali del tirante, che verranno meglio descritti in seguito, sono:

- Il dispositivo di bloccaggio e piastra di ripartizione della testata;
- Dispositivo di ancoraggio della fondazione;
- Armatura e guaina.

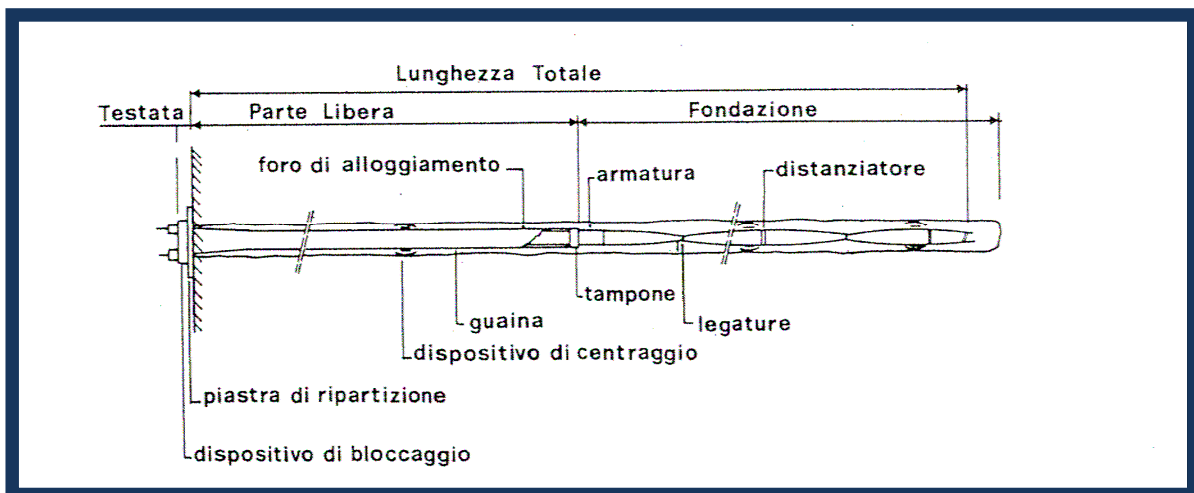


Figura 4
Schema tirante d'ancoraggio.
(da Rodino, 2008)

Durante il periodo d'esercizio il tirante raggiunge diverse fasi di carico raggiungendo dei valori-limite. Tra questi si evidenziano:

- il valore T_e , che rappresenta il massimo valore raggiungibile dal tirante durante le prove di carico effettuate sugli elementi d'ancoraggio,
- il valore T_a , che individua il carico d'esercizio accettabile, ossia la tensione che deve rimanere nel tirante per assicurare l'equilibrio finale della struttura contro la maggior parte delle azioni avverse che probabilmente (e ragionevolmente) accadranno durante tutta la vita d'esercizio,
- il valore T_L , che rappresenta il carico limite che il tirante può sopportare.

Dipende dalle dimensioni del bulbo di fondazione e corrisponde al più basso tra i seguenti due valori:

- lo sfilamento dell'elemento in tensione del tirante;
- la rottura del legame tra terreno e bulbo di fondazione.

Il valore dato da T_L/T_a rappresenta il fattore di sicurezza del tirante.

3.1.1 Materiali impiegati

I materiali utilizzati per la realizzazione di tiranti d'ancoraggio, di cui si fa una rapida illustrazione, devono possedere determinate caratteristiche fisiche, meccaniche e chimiche per poter rispondere al meglio alle sollecitazioni a cui saranno soggetti.

Come già visto in precedenza una delle parti funzionali dei tiranti è l'armatura.

Come già preannunciato, i tiranti possono essere presollecitati o non presollecitati

Per i tiranti presollecitati, se T_G indica la forza di trazione corrispondente al limite elastico del tirante, il carico d'esercizio T_a dovrebbe essere al massimo uguale ai seguenti valori:

$T_a < 0,75 T_G$ per tiranti temporanei usati per un periodo non superiore ai 18 mesi;

$T_a < 0,60 T_G$ per tiranti permanenti usati per periodi superiori ai 18 mesi.

Queste valutazioni sono fissate in relazione ai rischi legati alla corrosione.

Per tiranti non presollecitati (ancoraggio passivo): per questa tipologia di tiranti non protetti la sezione trasversale dell'acciaio utilizzata nei calcoli non è quella nominale ma viene ridotta, prendendo così in considerazione la perdita di acciaio che si avrebbe a causa della corrosione.

La fase successiva alla scelta del tirante idoneo, consiste nel scegliere la malta cementizia adatta ad assicurare il legame tra il tirante stesso e il terreno circostante.

La scelta del cemento si basa su due parametri: l'aggressività del terreno nei confronti del cemento e l'aggressività del cemento in relazione all'acciaio del tirante.

Con riferimento al primo parametro di analisi, i terreni nei quali i tiranti possono essere installati possono appartenere a due distinte categorie:

- terreni non aggressivi;
- terreni aggressivi.

In questa seconda categoria rientrano i suoli che contengono elementi aggressivi i quali vengono veicolati dalle acque di infiltrazione, ovvero, viceversa, suoli inerti che vengono attraversati da acque aggressive. I terreni considerati aggressivi possono essere a loro volta suddivisi in terreni mediamente aggressivi e terreni altamente aggressivi a seconda del grado di nocività delle acque o degli elementi contenuti nel terreno.

La categoria dei terreni altamente aggressivi include:

- terreni posti in ambienti aggressivi (ad esempio adiacenti al mare);
- terreni contenenti solfati;
- suoli in prossimità di falde acquifere aggressive;

Esempi di acque aggressive possono essere:

- acque pure che dissolvono la calce libera e i silicati e gli alluminati contenuti nel cemento;
- acque acide che attaccano la calce del cemento (es. acque industriali);
- acque che hanno un alto contenuto di solfati, che combinati con l'alluminato tricalcico contenuto nel cemento danno vita all'ettringite, con conseguente deterioramento della malta cementizia;
- acque seleniche: sebbene le condizioni di aggressività cambino a seconda che le acque seleniche siano stagnanti o in movimento, solitamente sono considerate molto aggressive quando il loro contenuto di anidride solforica SO_3 supera i 0,2 g/l per acque in movimento e 0,5 g/l per quelle stagnanti.

In base a quanto appena detto, la scelta del cemento rappresenta un'operazione delicata: nel caso di acque ad elevato contenuto di solfati o seleniche, i cementi da utilizzare sono quelli con basso contenuto di alluminato tricalcico e classificati come cementi per "lavori in acque seleniche"; invece per acque neutre o leggermente acide i cementi adatti sono quelli con un basso contenuto di calce libera o quelli capaci di fissarla. Questa categoria include i cementi pozzolanici e cementi d'altoforno ma qualora si ci trovasse in presenza di acque industriali o in atmosfera aggressiva, ogni problema deve essere esaminato singolarmente. I cementi che resistono ad acque moderatamente solfatiche sono quelli classificati come "cementi per costruzioni marine".

I terreni considerati non aggressivi sono quelli localizzati in ambienti dove nelle vicinanze ci sono falde acquifere non aggressive o dove queste non sono presenti.

In questi casi può essere usata la maggior parte dei cementi adatti alle costruzioni, ma facendo attenzione che il loro contenuto totale di cloro sia inferiore allo 0,05% del peso del cemento e il contenuto totale di zolfo sia inferiore allo 0,15%. Questi accorgimenti risultano fondamentali al fine di evitare il pericolo di corrosione sotto tensione.

In modo analogo occorre scegliere gli aggregati, che devono essere costituiti da elementi inerti privi di parti friabili e sostante nocive agli effetti della resistenza della miscela.

Gli addittivanti non dovrebbero contenere nessun componente aggressivo per l'acciaio e il cemento, quali ad esempio il cloruro di calcio. Per quanto riguarda le resine queste dovrebbero conservare le loro caratteristiche meccaniche per tutta la vita utile del tirante.

Le miscele ottenute dall'unione degli elementi sopra citati devono essere fluide: l'acqua d'essudazione deve essere inferiore al 2% del volume iniziale della miscela e deve essere riassorbita nelle 24 ore successive; il ritiro a 28 giorni non deve superare i 2.800 micron per metro e la resistenza a compressione dopo 7 giorni (misurata su un provino cilindrico con rapporto $H/D=2$) deve essere maggiore di 15 Mpa. Al fine di ottenere un buon risultato finale tali caratteristiche devono essere rigorosamente rispettate e controllate al momento della messa a punto della miscela d'iniezione.

3.1.2 Protezione

Da quanto visto sinora si può facilmente comprendere quanto sia importante la situazione ambientale nella quale andranno ad inserirsi i tiranti d'ancoraggio. Infatti dovranno essere valutate le condizioni di aggressività dell'ambiente circostante, costituito dal terreno, dalle acque sotterranee e superficiali e dall'atmosfera in modo da poter prendere le adeguate precauzioni, ad esempio impiegando materiali atti a garantire la funzionalità dei tiranti per la durata d'impiego prevista.

Con riferimento al paragrafo precedente, possono individuare due tipi di potenziali aggressioni:

- aggressione sull'acciaio;
- aggressione sulla malta cementizia.

In generale un sistema di protezione contro la corrosione per tiranti nei terreni e nelle rocce:

- deve garantire la conservazione degli elementi meccanici del tirante, mantenendo nel contempo un proprio stato di conservazione chimico-fisico accettabile rispetto alle funzioni protettive da assolvere;
- non deve interagire in maniera dannosa con l'ambiente circostante;
- deve essere costituito da materiali mutualmente compatibili, da un punto di vista elettrochimico, con le parti meccaniche del tirante;
- deve poter superare le fasi iniziali di manipolazione, installazione e taratura delle parti meccaniche del tirante senza subire danni funzionali, con riferimento soprattutto alle giunzioni tra i diversi elementi ed alle zone di variazione geometrica delle sezioni trasversali degli elementi stessi.

Il rischio di corrosione da parte dei tiranti varia considerevolmente con le caratteristiche fisiche dell'ancoraggio e con le condizioni di tensione durante la vita del tirante. Inoltre risulta necessario operare la distinzione già illustrata in precedenza tra i differenti di tiranti:

- tiranti ordinari, in barre;
- tiranti a trefoli, da presollecitare.

La protezione contro la corrosione degli acciai viene distinta a seconda che si tratti di tiranti ordinari o da presollecitare.

Nel caso dei tiranti ordinari quando questi sono posti a diretto contatto con il terreno, le precauzioni da assumere al fine di evitare la loro corrosione e dunque mantenere inalterate le prestazioni dei tiranti sono:

- scegliere delle barre d'acciaio aventi sezione sovradimensionata,
- rivestire le barre con uno spesso strato di vernice bituminosa o, in caso di ambienti aggressivi con una vernice anticorrosiva.

Risulta essenziale che ogni tirante sia costruito con acciaio di identica composizione in modo da avere la stessa caduta di potenziale elettrico.

I tiranti presollecitati sono soggetti ad alte e permanenti trazioni. In assenza di una adeguata protezione questi potrebbero incorrere in una rottura causata dalla corrosione. Questo può essere prevenuto, come già preannunciato, incrementando la sezione dell'acciaio.

La protezione dalla corrosione è opportuno assumerla lungo tutto il tirante: su tutta la lunghezza di fondazione, sull'intera lunghezza libera fino ad arrivare alla testa d'ancoraggio.

Il grado di protezione è da decidere in base a due principali parametri: la vita d'esercizio del tirante e le condizioni di aggressività del suolo nel quale verrà inserito. Per quanto riguarda la vita d'esercizio i tiranti possono suddividersi in tre classi:

- tiranti temporanei per una vita d'esercizio massima di 9 mesi;
- tiranti temporanei per una vita d'esercizio massima di 18 mesi;
- tiranti temporanei per una vita d'esercizio massima oltre i 18 mesi, tiranti permanenti.

La protezione può avvenire prima della messa in trazione o successivamente. Nel primo caso questa protezione viene applicata solitamente in fabbrica e ha un duplice obbiettivo: prevenire la corrosione durante il lasso di tempo tra la posa in opera del tirante nel terreno e la successiva trazione di questo e assicurare una protezione permanente per tutta la durata della vita d'esercizio del tirante. In questo caso si usano come protezione delle pitture composte da prodotti che assicurano una certa flessibilità.

Nel caso di protezione dopo la avvenuta trazione si vuole evitare la rottura da corrosione durante la vita d'esercizio del tirante e si applicano, come nel caso precedente, delle vernici che permettano la flessibilità, ma nel caso di tiranti permanenti queste vengono sostituite da vernici che tendono a creare uno strato d'irrigidimento.

I gradi di protezione possono essere ordinati in modo crescente in base alla durabilità attraverso i simboli P0, P1, P2.

P0: implica nessuna protezione, ossia l'elemento d'acciaio è protetto dal terreno attraverso la sua guaina.

P1: può essere applicata prima o dopo la messa in tensione del tirante a seconda del tipo di prodotto usato e in base all'aggressività dell'ambiente in cui verrà inserito. Tale grado di protezione consiste nel riempimento di uno spazio anulare in una guaina sigillante tramite prodotti adeguati quali:

- anticorrosivo oleoso, lubrificante;
- bitume;
- cemento o miscela di cemento e bentonite.

P2: anch'essa può essere applicata prima o dopo la trazione dell'acciaio, a seconda del tipo di prodotto usato e in base all'aggressività dell'ambiente d'inserimento. Come per il grado P1 la protezione consiste nel riempimento di uno spazio anulare in una guaina sigillante tramite prodotti adeguati quali:

- resine (devono essere estensibili, assicurare un continuo contatto con l'acciaio, restare stabile nel tempo, ecc);
- lubrificanti;
- cementazione (solo per ancoraggi temporanei, rappresenta una protezione rigida).

La protezione alla corrosione per quanto riguarda la lunghezza libera del tirante può essere così riassunta:

Tipo di ambiente	Vita d'esercizio dei tiranti		
	Meno di 9 mesi	9-18 mesi	Più di 18 mesi
Non aggressivo	P0	P1	P2
Moderatamente aggressivo	P1	P2	P2
Molto aggressivo	P2	P2	P2

Va ricordato che per gli ancoraggi permanenti non sono permessi dei sistemi di protezione rigidi, in quanto questo non permetterebbe le successive tesature nel caso queste siano necessarie nel tempo, ma non risulta essere una buona soluzione nemmeno la protezione catodica o la protezione attraverso la galvanizzazione.

Il grado di protezione nei confronti della fondazione dei tiranti deve essere lo stesso di quello utilizzato sul tratto libero; in questo caso bisogna tener conto che i metodi e i prodotti di protezione utilizzati devono permettere il trasferimento al terreno degli alti carichi imposti al tirante.

Oggigiorno, raggiunto un ragguardevole livello di conoscenze in materia, si è potuto stabilire che gli unici prodotti accettati in grado di assicurare la duplice finzione di collegamento e protezione dalla corrosione sono i cementi e le resine.

La protezione di grado P1 assicurata dalla malta cementizia può considerarsi sufficiente qualora vengano rispettate alcune prescrizioni quali:

- il tirante deve essere equipaggiato da elementi di centraggio e deve essere posto in un foro precedentemente riempito di malta cementizia altamente legante in modo da assicurare una copertura continua;
- devono essere utilizzate alte pressioni d'iniezione.

Il grado di protezione P2 richiede l'utilizzo di guaine protettive lungo l'intera lunghezza della fondazione. La funzione di tale guaina è di prevenire ogni tipo di contatto tra l'elemento in trazione circondato di malta cementizia e il terreno circostante in modo da evitare possibili rotture causate dalle forze di trazione.

L'iniezione all'interno dello spazio anulare tra la guaina e l'armatura rappresenta l'elemento d'unione tra quest'ultimi e può essere eseguita:

- come operazione iniziale realizzata direttamente in cantiere;

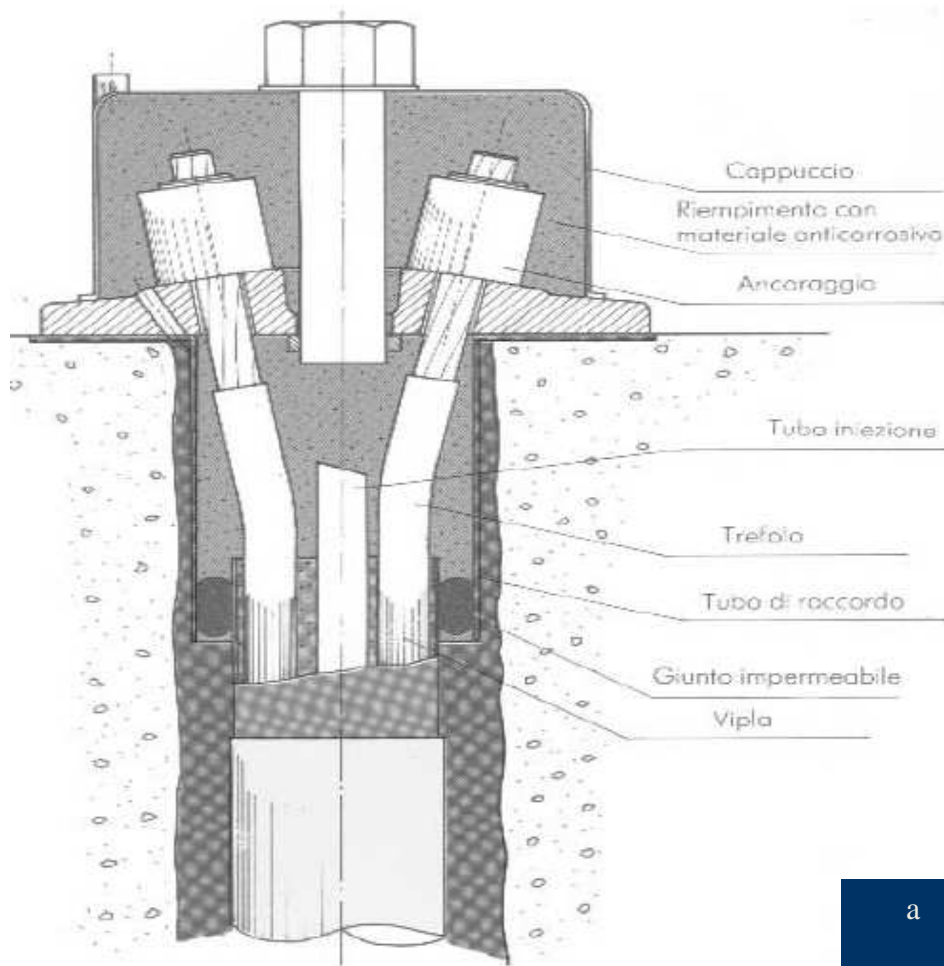
- contemporaneamente alla posa in opera del tirante nel terreno;
- dopo aver creato il legame tra la guaina e il terreno.

Le guaine possono essere distinte in due classi:

- guaine flessibili: solitamente la loro superficie è corrugata in modo da favorire il trasferimento dei carichi dalla fondazione al terreno adiacente. I materiali utilizzati devono sopportare bene gli allungamenti e devono essere fisicamente e chimicamente stabili se sottoposti a trazione; solitamente vengono utilizzate guaine in polietilene, polipropilene e PVC.
- Guaine rigide: comunemente vengono adottate quelle metalliche, formate da tipi di acciaio con caratteristiche compatibili con l'armatura.

Una zona fortemente soggetta a corrosione è la connessione tra la testa e la struttura del tirante.

In questa zona realizzare un'adeguata protezione contro la corrosione è un'operazione critica. I metodi utilizzati hanno il compito di assicurare una perfetta continuità con la protezione scelta per la lunghezza libera. La protezione adatta consiste in un tubo sagomato accoppiato ad una piastra, il tutto chiuso da un cappuccio protettivo e immerso in una miscela cementizia anticorrosiva (vedi figura 5).



a



b

Figura 5

Testa d'ancoraggio del tirante.

- a) schema del sistema di protezione;
- b) esempio di piastra d'ancoraggio.

Quando i lavori vengono eseguiti in ambienti aggressivi, la protezione dalla corrosione deve precedere o seguire immediatamente le operazioni di messa in opera del tirante nel terreno. In ambienti non aggressivi, invece, il tempo disponibile per porre la protezione deve avvenire entro 1 mese dalla posa del tirante o 2 settimane dopo la sua messa in trazione (nel caso non sia già stata eseguita una protezione iniziale).

Nel caso fosse impossibile effettuare l'adeguata protezione successivamente alla posa in opera del tirante diviene essenziale eseguire tale operazione precedentemente.

Qualora la protezione sia fornita da iniezioni di malta queste dovranno essere effettuate dal basso verso l'alto aumentando progressivamente la pressione.

3.1.3 Progetto ed esecuzione

Durante le fasi di progetto occorre prendere in considerazione non solo le caratteristiche dell'opera da realizzare ma anche la situazione ambientale del sito e i requisiti ai quali devono soddisfare i tiranti.

Il progetto di un sistema di tiranti richiede solitamente l'esecuzione di due tipi di analisi:

- la prima è riferita al complesso dei tiranti ed è solitamente eseguita con l'analisi dell'equilibrio limite relativamente a meccanismi cinematici di collasso opportunamente scelti;
- la seconda è riferita al tirante singolo e riguarda il dimensionamento della fondazione e dell'armatura del tirante stesso.

Nel momento della progettazione occorre tenere presente anche l'influenza esercitata dall'opera ancorata sui manufatti adiacenti (per quanto riguarda deformazioni, spostamenti e stabilità globale) e, altro fattore molto importante, la distanza dei tiranti da altre opere circostanti ed in particolare dalle loro fondazioni e da eventuali canalizzazioni sotterranee.

Le operazioni di costruzione e installazione di tiranti includono:

- perforazione del foro nel quale l'ancoraggio sarà posizionato,
- posa del tirante, connessione del tirante con il terreno,
- messa in trazione del tirante,
- applicazione della protezione e, nel caso di tiranti temporanei, rilascio tensionale.

Per alcuni tipi di tiranti non tutte le operazioni sopra elencate vengono eseguite e, in altri casi, queste potrebbero essere realizzate con un diverso ordine cronologico.

Le operazioni verranno esaminate separatamente.

Perforazione

Questo processo risulta essere particolarmente delicato in quanto qualunque modifica delle caratteristiche del terreno potrebbe causare disordini nell'area circostante.

Le tecniche adeguate per eseguire un'accurata perforazione includono:

- Condizioni in cui non è presente una falda acquifera alla testa del foro: vengono impiegate tecniche che usano macchine perforatrici introducendo un elemento di rivestimento del foro oppure si eseguono perforazioni senza rivestimento ma si assicura la stabilità del foro attraverso liquidi di perforazione quali acqua, aria, fango bentonitico, ect.;
- Condizioni in cui la perforazione avviene in presenza di falda acquifera in pressione: si deve provvedere ad assicurare il controllo dell'acqua alla testa del foro, utilizzano fluidi di perforazione pesanti, pre-cementazione del suolo, ecc.

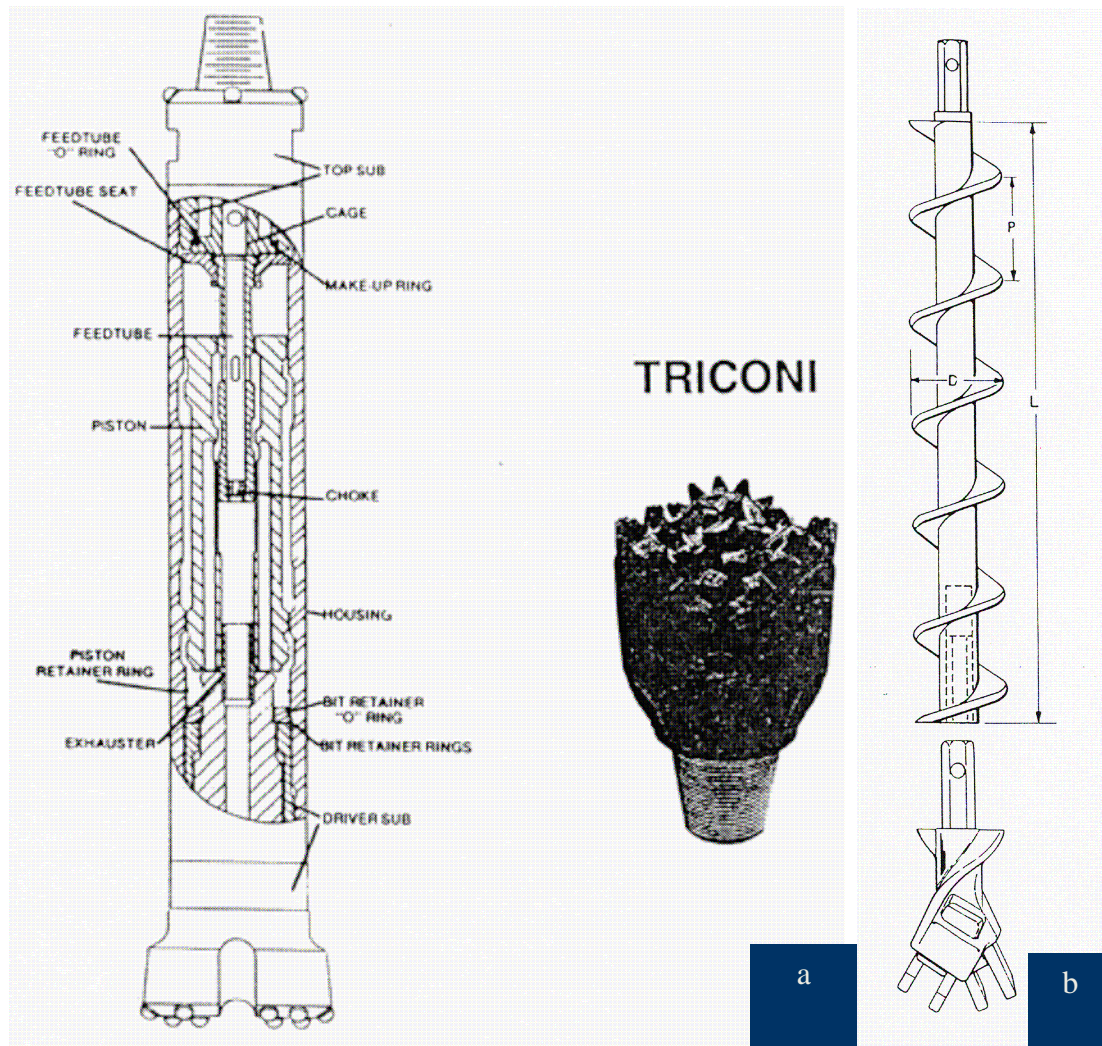


Figura 6
Metodi di perforazione.
a) martelli a fondo foro;
b) asta perforatrice;
c) perforazione in opera.
(da Rodino, 2008.

Posa del tirante

Nel caso in cui la perforazione avvenga in contemporanea con l'introduzione di fluidi, questi devono essere fatti fuoriuscire dal foro tramite l'iniezione cementizia permanente dopo che il tirante è stato inserito. Deve essere presa ogni tipo di precauzione in modo da assicurare che né il tirante né la guaina di protezione si deteriorino durante l'inserzione.

Connessione dell'ancoraggio con il terreno

La solidarizzazione dell'armatura al terreno viene eseguita in due o più fasi, come specificato di seguito. Si utilizza una miscela cementizia conforme alle specifiche per densità, chimismo e proprietà tecniche.

Fase di prima cementazione: è eseguita all'atto del completamento della perforazione, e prevede l'impiego di un volume di miscela cementizia commisurato al volume teorico del foro. In questa fase si eseguiranno anche le operazioni di riempimento del sacco otturatore, ove presente, e del bulbo interno per i tiranti definitivi, utilizzando quantitativi di miscela corrispondenti ai volumi teorici degli stessi.

Iniezioni selettive a pressioni e volume controllati: trascorso un periodo di 12, 24 ore dalla formazione della guaina, si dà luogo all'esecuzione delle iniezioni selettive per la formazione del bulbo di ancoraggio, procedendo valvola per valvola, a partire dal fondo.

L'iniezione dovrà essere tassativamente eseguita utilizzando portate non superiori a 30l/min, e comunque con valori che, in relazione alla effettiva pressione di impiego, siano tali da evitare fenomeni di fratturazione idraulica del terreno (*claquage*).

I valori di iniezione saranno di norma non inferiori a 2.5 volte il volume teorico del foro e comunque conformi alle prescrizioni di progetto. Nel caso in cui l'iniezione del previsto volume non comporti il raggiungimento della prescritta pressione di rifiuto, la valvola sarà nuovamente iniettata trascorso un periodo di 12 -24 ore. Fino a quando le operazioni di iniezione non saranno concluse, al termine di ogni fase occorrerà procedere al lavaggio interno della canna.

Messa in trazione

Quando la malta cementizia è sufficientemente indurita (dopo circa 5 giorni), il tirante può essere messo in trazione. La procedura include le seguenti operazioni:

- applicazione, in vari livelli, di un carico di prova T_e con simultanea misurazione degli spostamenti del tirante;
- mantenimento del carico T_e per un periodo di tempo limitato e misurazione dei corrispondenti spostamenti;
- nel caso in cui le misurazioni fatte rientrino nei criteri d'accettazione si può eseguire un rilascio tensionale fino al valore di carico T_b , raggiunto il quale si può bloccare la trazione del tirante.
- rilascio dell'applicazione del carico.

Rilascio della trazione

Nel caso di tiranti temporanei, il rilascio della trazione può avvenire solo qualora le forze rilasciate siano bilanciate e sostituite da forze applicate dalla struttura. Questo bilanciamento è solitamente assicurato dall'intera struttura o da parti di essa. Non va dimenticato che questa fase di rilascio è estremamente delicata, pertanto è necessario prendere le dovute precauzioni per la messa in sicurezza delle squadre operative.

Per le stesse ragioni anche le operazioni di messa in trazione e di cementazione in pretensione nella costruzione di tiranti d'ancoraggio devono essere fatte da operai specializzati, infatti molti incidenti durante la realizzazione di tali elementi sono causati da manodopera inesperta, da un'errata progettazione o anche da un'insufficiente supervisione in sito da parte dei progettisti.

Per ciascun tirante devono inoltre essere compilati i rapporti relativi alle varie fasi esecutive, sui quali devono essere indicate tutte le informazioni inerenti a:

- le tipologie di perforazione adottate e le caratteristiche dei terreni attraversati;
- la composizione dei tiranti e le protezioni adottate;
- le modalità esecutive delle iniezioni e le tipologie della miscela;
- le fasi di taratura e le modalità di controllo delle misurazioni.

Questa operazione permette di ottenere una scheda dettagliata di ogni tirante installato in modo da poter eseguire successivamente un'efficiente monitoraggio nel tempo.

3.1.4 Prove e collaudo

I test si pongono l'obiettivo di valutare la qualità della connessione tra il tirante ed il terreno in cui esso è inserito applicando delle forze di trazione statiche.

Al termine dei lavori i tiranti devono essere sottoposti a **collaudo**, cioè ad una prova di tesatura non distruttiva per il controllo esecutivo di tutti gli ancoraggi tramite un ciclo semplice di carico e scarico.

Infatti, nonostante i sistemi d'ancoraggio ed in particolare i tiranti, siano diventati d'uso comune, è necessario individuare tramite l'utilizzo di sistemi di monitoraggio i problemi che potrebbero insorgere. Il monitoraggio dei carichi è obbligatorio per i tiranti permanenti e per quelli temporanei destinati a restare in servizio più di 18 mesi. Nel caso di tiranti temporanei con durata in servizio inferiore o uguale a 18 mesi, il monitoraggio avviene soltanto qualora le specifiche di progetto lo ritengano necessario.

3.1 IMPIEGO DEI TIRANTI IN ROCCIA

Prima di definire le modalità di ancoraggio in roccia, occorre definire cosa si intende per ammasso roccioso. Questo è caratterizzato da una elevata coesione che resta invariata anche dopo un prolungato contatto con l'acqua, infatti è proprio tale proprietà a differenziarlo dalle terre, le cui caratteristiche sono invece sensibili al contenuto d'acqua presente in esse.

Quando si considera l'ammasso roccioso nella sua sede occorre prestare attenzione alle discontinuità strutturali proprie delle condizioni naturali, in quanto proprio tramite lo studio dei parametri che costituiscono le caratteristiche delle discontinuità è possibile individuare i potenziali dissesti. Tali parametri sono:

- l'orientazione o giacitura delle discontinuità: è espressa dai due angoli α e ψ che rappresentano rispettivamente l'immersione e l'inclinazione del piano su cui giace la discontinuità;
- la spaziatura: indica la distanza tra discontinuità adiacenti e viene misurata in direzione ortogonale alle discontinuità stesse;
- la persistenza: indica la lunghezza della traccia della discontinuità nella direzione della sua profondità di inserimento all'interno dell'ammasso roccioso;
- la scabrezza: è suddivisa in scabrezza a piccola e grande scala, dove quest'ultima prende il nome di ondulazione;
- la resistenza di parete: è anche detta resistenza a compressione monoassiale dei lembi affacciati di una discontinuità. Questo parametro è misurato con lo sclerometro o martello di Schimdt;
- l'apertura: misurazione della larghezza delle discontinuità, ovvero la distanza tra i lembi della frattura;
- le caratteristiche relative al materiale di riempimento: lo spazio compreso tra le pareti di una discontinuità può essere vuoto, ma più sovente può essere riempito con acqua o con altri materiali quali per esempio sabbia, limo o argilla ed il loro comportamento può influenzare notevolmente il comportamento del blocco di roccia. Ad esempio, nei casi in cui il materiale di riempimento sia un'argilla e sia presente acqua nella discontinuità, è possibile che a causa della sua bassa permeabilità, si formino delle ulteriori pressioni all'interno dei giunti in grado di provocare uno spostamento relativo dei blocchi.

Tali discontinuità, spesso raggruppabili in famiglie, possono essere rappresentate graficamente su particolari diagrammi chiamati *reticoli stereografici*, che vengono realizzati soltanto attraverso la

conoscenza dei valori di immersione e inclinazione della discontinuità.

Questo tipo di rappresentazione è di grande utilità dal momento che consente di individuare tutti i cinematismi possibili per il pendio studiato (figura 6) e che possono essere classificati in:

- scivolamento planare;
- scivolamento a cuneo;
- ribaltamento.

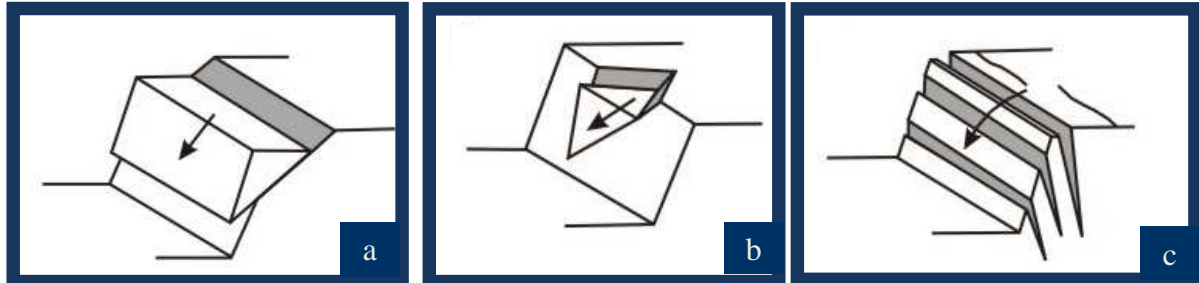


Figura 6

Classificazione dei cinematismi in roccia.

a) scivolamento planare; b) scivolamento a cuneo; c) ribaltamento.

(Da Scavia, 2008)

Un altro elemento da non sottovalutare è la presenza di acqua all'interno delle discontinuità. Infatti essendo questa in grado di saturare i giunti, può influenzare la stabilità del pendio agendo come un'ulteriore forza di spinta sulle pareti del giunto di discontinuità e dell'eventuale giunto di trazione, causando così una maggiore instabilità della struttura.

I crolli in roccia solitamente sono eventi non prevedibili, che si verificano in modo casuale e senza segni premonitori se non per qualche possibile emissione acustica o improvvise venute d'acqua lungo la parete rocciosa. Proprio per tali ragioni sono dissesti altamente pericolosi, che si deve tentare di evitare attraverso delle operazioni di messa in sicurezza preventiva ed un monitoraggio costante di eventuali fratture "critiche" di cui si è stimato un rapido aumento dell'apertura nel corso del tempo.

Per quanto riguarda le operazioni da eseguire su fronti di roccia in condizioni di instabilità è possibile fare ricorso a due categorie di interventi:

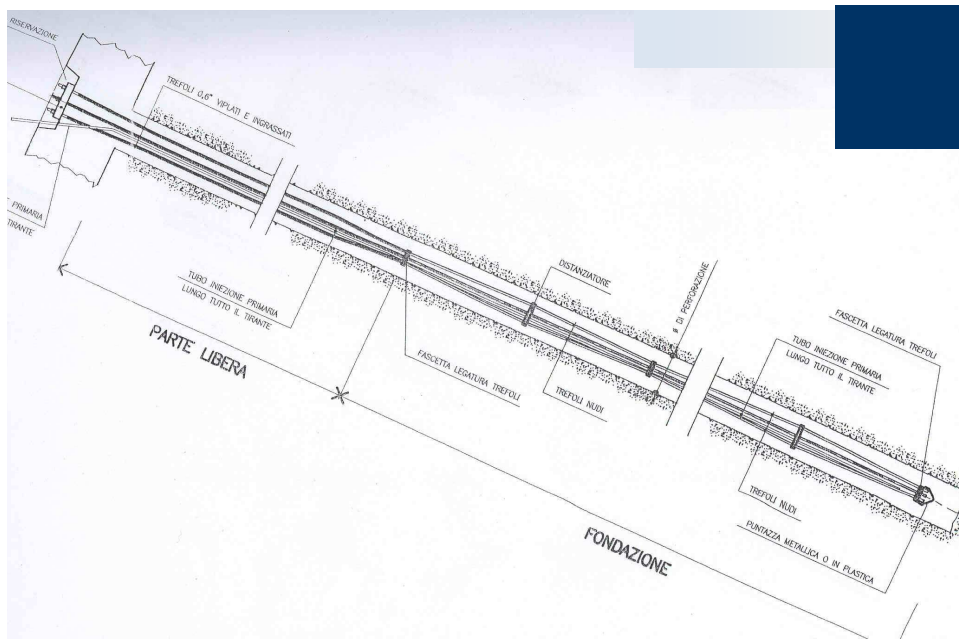
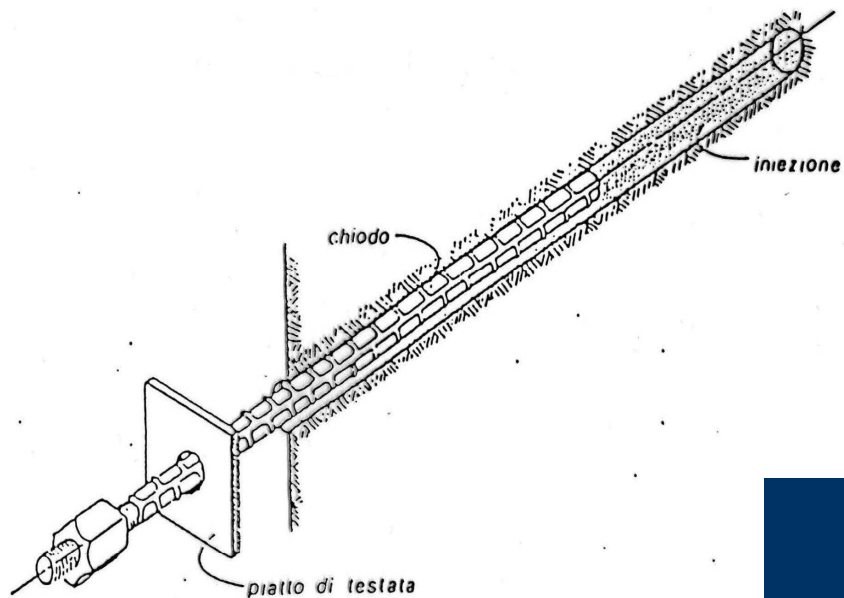
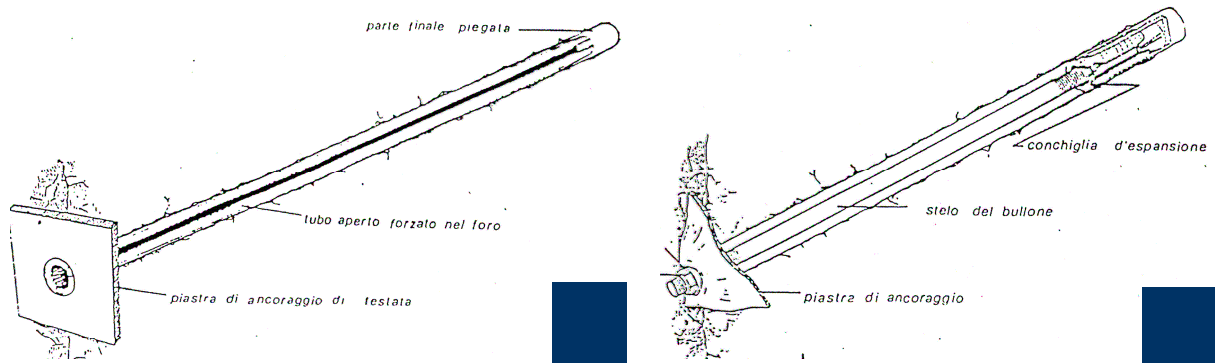
- interventi passivi: solitamente sono posizionati a valle del pendio e non applicano nessuna forza al versante, hanno lo scopo di trattenere le porzioni di materiale che si distaccano dal versante e sono costituiti soltanto da elementi quali reti paramassi, valli, gabbionate, gallerie artificiali, etc. In figura 7 sono mostrati alcuni esempi di tali elementi.





Figura 7
Interventi passivi.
a-b) reti paramassi; c) galleria paramassi; d) vallo paramassi in terra rinforzata

- interventi attivi: sono posti direttamente sul fronte e applicano vincoli alla porzione di pendio dissestata in modo tale da evitare la caduta di blocchi instabili. Tra queste tipologie di ancoraggio rientrano chiodature e bullonature, i tiranti (ancoraggi), il calcestruzzo proiettato (spritz-beton), i muri di contenimento in c.a., i drenaggi, le reti e le operazioni di disaggancio. In figura 8 sono riportati alcuni esempi degli elementi sopra elencati.



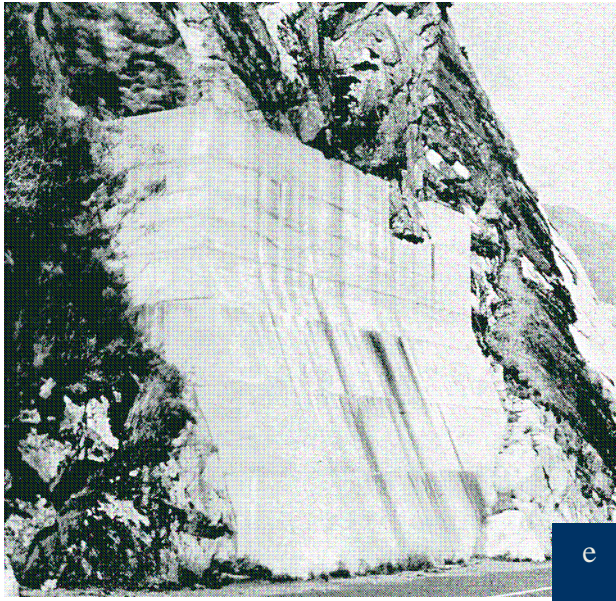


Figura 8
Interventi attivi.

a) ancoraggio ad attrito; b) bullone ancorato con conchiglia d'espansione; c) chiodo iniettato non tesato; d) tirante a trefoli; e) muro in c.a.; f) spritz-beton. (da Scavia, 2008).

Come si evince dalla classificazione appena illustrata, i tiranti e le chiodature solitamente utilizzate per la stabilizzazione dei pendii rientrano nella categoria degli interventi attivi, in quanto sono realizzati con barre o tiranti a trefoli posti in trazione dopo essere stati ancorati nel versante con meccanismi meccanici o di iniezione.

Vengono messi in carico al momento della posa in opera, quando nell'ammasso roccioso non si è ancora verificato alcun tipo di movimento, impedendo dunque che il fenomeno di instabilità avvenga. L'effetto stabilizzante è inoltre accompagnato dal contenimento delle deformazioni e dall'assenza di apertura dei giunti di trazione, causa della formazione di blocchi instabili.

Talvolta può essere prevista l'applicazione di un precarico, che produce effetti positivi in quanto riduce le forze instabilizzanti e incrementa quelle resistenti: se la forza applicata con il pretensionamento dell'elemento è orientata in modo tale da opporsi al movimento di scivolamento del volume instabile, si ha una diminuzione dello sforzo di taglio agente ed inoltre, all'aumento della pressione normale alla superficie di scorrimento, corrisponde un incremento della resistenza al taglio mobilitata lungo la stessa.

Tuttavia la componente di resistenza al taglio dovuta alla scabrezza delle pareti del piano di scivolamento può aumentare o diminuire per effetto della forza di pretensionamento: la pressione normale alla superficie di scivolamento incrementa il grado di interconnessione delle asperità presenti sulle superfici a contatto ma, allo stesso tempo, può determinare la rottura per concentrazione degli sforzi.

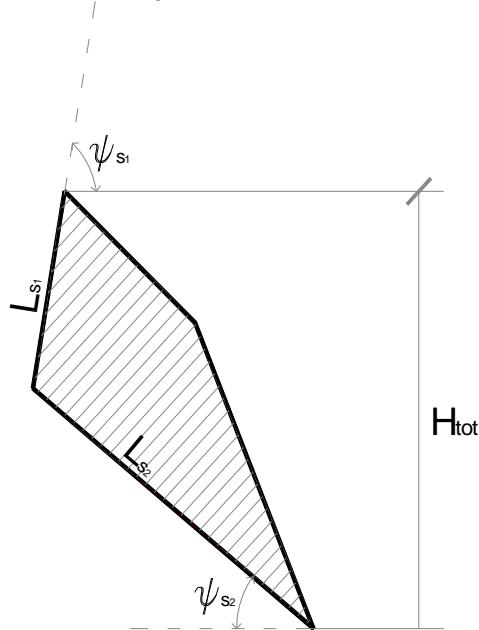
Uno dei vantaggi derivante dall'adozione dei sistemi attivi è che le forze in gioco sono note, pertanto è possibile controllare ogni elemento posto in opera in quanto, attraverso prove di carico, si controlla il reale sforzo trasmesso all'ammasso roccioso. Questo aspetto è fondamentale poiché la durabilità di questi sistemi è un fattore critico per la stabilità a lungo termine dei fronti in roccia. Perciò è necessario eseguire misure di controllo periodiche delle sollecitazioni sugli ancoraggi per verificare eventuali variazioni delle sollecitazioni negli elementi, in genere dovute al rilassamento o a comportamenti viscosi della massa rocciosa e alla corrosione degli elementi metallici.

3.2.1 DETERMINAZIONE DEL TIRO

I tiranti e le chiodature in roccia devono essere adeguatamente dimensionati in modo da porre in sicurezza il versante tramite l'applicazione di forze resistenti maggiori di quelle instabilizzanti, identificate con nome di *tiro* dell'elemento di ancoraggio.

Riportiamo un esempio di calcolo relativo ad un blocco di roccia instabile al fine di illustrare il percorso che porta alla definizione del tiro.

In primo luogo occorre identificare la porzione di roccia instabile attraverso l'individuazione delle caratteristiche dell'ammasso roccioso descritte in precedenza, quali la collocazione delle discontinuità descritte dalla loro direzione d'immersione e angolo d'inclinazione. La figura 9 mostra la geometria di tale porzione rocciosa).



Dove:

S_1 e S_2 : sistemi di discontinuità

Nei calcoli si farà riferimento ad una profondità pari ad 1 m.

Figura 9
Geometria del blocco instabile.

Un fattore rilevante e da non sottovalutare nelle formazioni rocciose, è la presenza d'acqua in quanto può essere responsabile di sollecitazioni che possono favorire il cinematisimo. Infatti l'acqua infiltrandosi lungo le discontinuità S_1 e S_2 è possibile che saturi i giunti di trazione, provocando delle pressioni sul blocco di roccia già instabile.

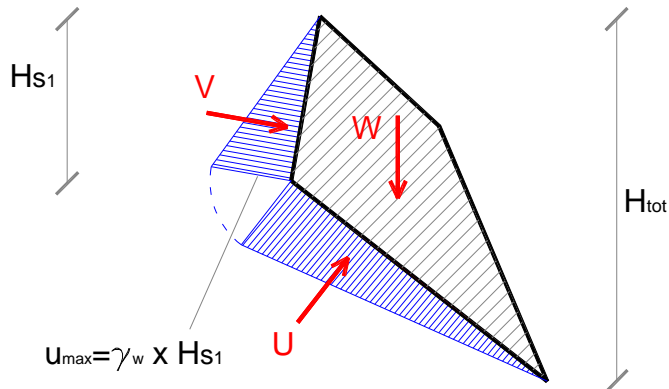
Al fine dei calcoli e ponendosi a favore di sicurezza, i giunti verranno considerati completamente saturi.

Inoltre è possibile prevedere due differenti situazioni di pressioni idrauliche:

- 1) acqua libera di circolare (figura 10);
- 2) acqua non libera di circolare (figura 11).

Esaminiamo i due casi graficamente.

1)



$$u_{\max} = \gamma_w \cdot H_{s1}$$

dove:

u_{\max} = valore massimo della spinta dovuta all'acqua

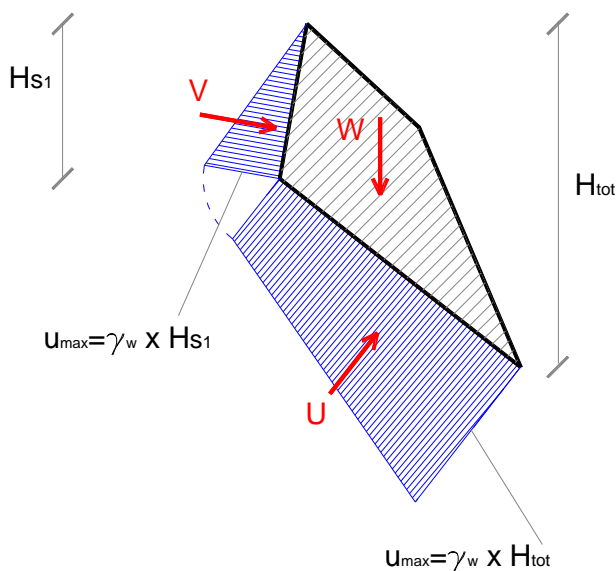
γ_w = peso di volume specifico dell'acqua $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$

H_{s1} = altezza di approfondimento acqua in giunto di roccia

Figura 10
Concio in roccia soggetto a pressioni idrauliche.

In questo caso l'acqua è libera di circolare nei giunti ed è il caso che viene comunemente utilizzato ai fini dei calcoli.

2)



$$u_{\max} = \gamma_w \cdot H_{\text{tot}}$$

dove:

u_{\max} = valore massimo della spinta dovuta all'acqua

γ_w = peso di volume specifico dell'acqua $\gamma_w = 10 \text{ KN/m}^3$

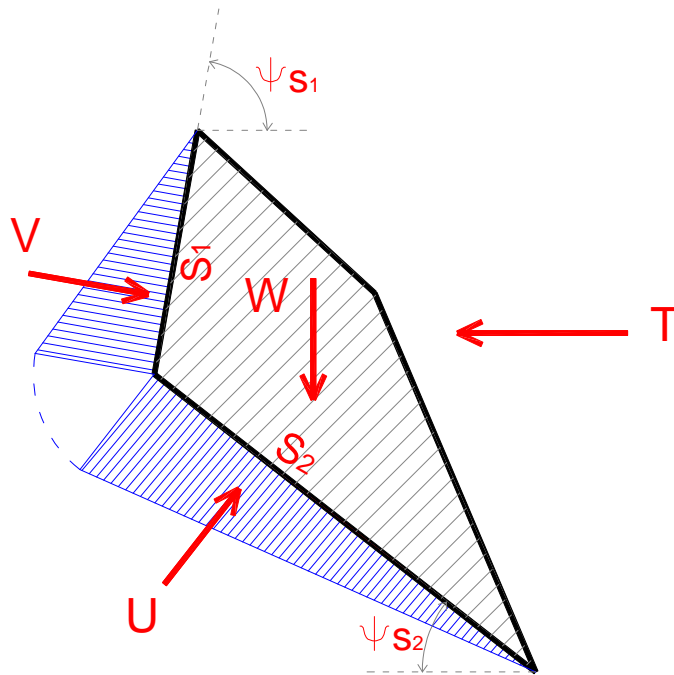
H_{tot} = altezza di approfondimento acqua in giunto di roccia nel caso di circolazione impedita

Figura 11
Concio in roccia soggetto a pressioni idrauliche.

Questa seconda situazione ben rappresenta la condizione in cui si formano dei "tappi" di ghiaccio in corrispondenza del canale di uscita dell'acqua, impedendone così la circolazione e provocando un aumento della pressione idraulica all'interno delle discontinuità, fattore sfavorevole ai fini della stabilità

del blocco roccioso.

Ipotizzando di porsi nelle condizioni idrauliche illustrate nel caso 1 e nelle condizioni di sollecitazione mostrate in figura 12, è possibile calcolare le forze agenti sulla porzione di roccia in esame al fine di determinare il valore del tiro T.



Del blocco qui rappresentato sono noti:

- ψ_{s1} e ψ_{s2}
- peso del blocco W:

$$W = \gamma_r \cdot A_b \cdot 1m$$

in cui:

γ_r = peso specifico della roccia

A_b = area del blocco di roccia

Figura 12

Identificazione delle forze agenti sul blocco roccioso.

Come prima cosa occorre calcolare il fattore di sicurezza del blocco e dimostrare la sua instabilità attraverso l'ottenimento di valori inferiori a quelli prescritti dalle normative vigenti.

Tale FS è dato dal rapporto tra forze resistenti e forze instabilizzanti, facendo riferimento al piano della discontinuità lungo il quale è possibile che avvenga il movimento franoso, che nel caso in esame corrisponderà al piano S_2 .

Come preannunciato tra le caratteristiche inerenti l'ammasso roccioso rientra la scabrezza che rappresenta il grado di corrugazione della superficie della discontinuità e viene suddivisa in scabrezza a piccola e grande scala. Questa proprietà risulta essere molto importante in quanto può influenzare il calcolo delle forze resistenti: infatti una superficie corrugata può aumentare il grado di interconnessione tra le superfici a contatto, incrementando quindi l'attrito tra le due e sfavorendo lo scivolamento. Tale fenomeno è rappresentato dall'angolo d'attrito di picco relativo al pendio esaminato e ricavato attraverso espressioni che mettono in relazione quanto rilevato sul campione prelevato e la situazione presente sull'intero pendio (effetto scala).

In particolare dai provini di roccia si ricava la scabrezza a piccola scala, rappresentata dal valore JRC_o attraverso il confronto con profili di scabrezza di riferimento (legge di Barton-Bandis):

$$JRC_o = \frac{JRC_1 + JRC_2 + JRC_3}{3}$$

dove:

JRC_0 = scabrezza del provino

JRC_1, JRC_2, JRC_3 ricavati dal confronto sopra citato tra i profili rilevati e quelli di riferimento.

Dal parametro JRC_0 appena descritto è possibile ricavare JRC_n , che rappresenta invece la scabrezza su grande scala tenendo conto delle dimensioni del pendio effettivamente indagato e distribuendo il valore di scabrezza rilevato sui campioni su tutta la grandezza del versante oggetto di studio:

$$JRC_n = JRC_o \cdot \left(\frac{L_n}{L_o} \right)^{-0,02 \cdot JRC_o}$$

in cui:

JRC_n = scabrezza di sito

JRC_0 = scabrezza del provino

L_n = lunghezza del giunto in sito

L_o = lunghezza del giunto in laboratorio

Attraverso questi due parametri è possibile calcolare l'angolo di attrito di picco del versante esaminato tramite la formula:

$$\phi_p = JRC_n \cdot \log \frac{JSC}{\sigma_n} + \phi_b$$

dove:

ϕ_p = angolo di attrito di picco

JRC_n = scabrezza di sito

JCS = joint compressive strength (valore desunto da prova con sclerometro in sito)

σ_n = valore medio di tensione stimato in funzione del peso del blocco

ϕ_b = angolo di attrito di base desunto da prove di taglio su campioni di roccia lisci

Conoscendo ϕ_p è ora possibile ricavare il valore del FS, scomponendo le forze che sollecitano il blocco lungo la linea del piano di scivolamento e suddividendole a seconda che esse forniscano un contributo favorevole o no nei confronti della stabilità, ottenendo:

$$F_s = \frac{\text{resistenti}}{\text{scivolanti}} \longrightarrow F_s = \frac{(W_n - U - V_n) \cdot \tan \phi_p}{W_t + V_t}$$

in cui:

$V_n = V \cdot \sin \beta$ = componente normale della spinta dovuta all'acqua

$V_t = V \cdot \cos \beta$ = componente tangenziale della spinta dovuta all'acqua

$W_t = W \cdot \sin \Psi_{s_2}$ = componente tangenziale del peso del concio

In figura 13 è mostrata la scomposizione delle forze W e V nelle componenti sopra descritte.

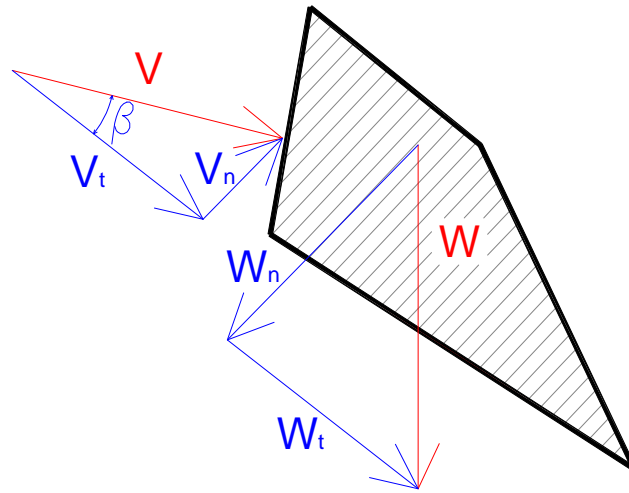


Figura 13
Scomposizione delle forze agenti sulla porzione di roccia.

Nel caso in cui siano presenti anche le componenti instabilizzanti dovute al sisma, la formula del fattore di sicurezza si modificherà nel seguente modo:

$$F_s = \frac{(W_n - (k_v \cdot W)_n - (k_v \cdot W)_t - U - V_n) \cdot \tan \varphi_p}{W_t + (k_h \cdot W)_t - (k_h \cdot W)_n + V_t}$$

Le forze in gioco durante il sisma vanno ad influire sulla forza peso del blocco, generando dei vettori sismici aventi punto d'applicazione e verso come mostrato in figura 14.

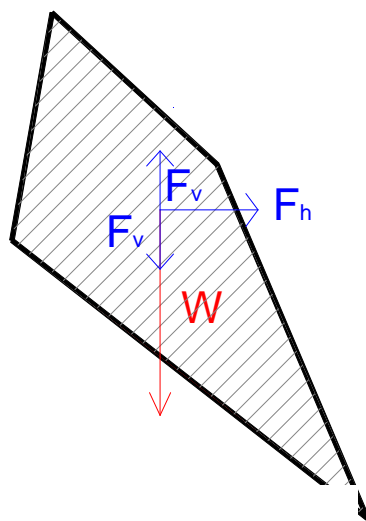


Figura 14
Vettori sismici.

dove:

$F_h = K_h \cdot W$ = componente orizzontale della forza sismica

$F_v = K_v W$ = componente verticale della forza sismica

$K_v = \pm 0,5 \cdot k_h$ = coefficiente sismico verticale

$K_h = \beta_s \cdot \frac{a_{\max}}{g}$ = coefficiente sismico orizzontale

W = peso proprio del blocco

b_s = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa in sito

a_{\max} = accelerazione orizzontale massima in sito

g = accelerazione di gravità

Qualora il FS calcolato non rispetti i limiti forniti dalle normative in vigore, occorre provvedere a progettare un intervento capace di portare tale fattore ai minimi di legge, assicurando così una stabilità al versante interessato. Per far ciò si deve determinare il tiro T da applicare al fronte.

La forza T mostrata in figura rappresenta l'elemento da inserire nell'ammasso roccioso atto a contrastare le forze instabilizzanti e viene posto orizzontalmente in modo da considerare la reale posizione che assumerà il tirante nella realtà. Infatti la direzione migliore e più efficace sarebbe quella normale al piano di scivolamento, ma questo comporterebbe maggiori sforzi e complicazioni agli addetti ai lavori al momento della realizzazione dell'elemento stesso, pertanto sia nella realtà che nei calcoli viene assunto in posizione orizzontale.

Scomponendo la forza incognita T secondo la direzione di scivolamento, inserendo le rispettive componenti nella formula del fattore di sicurezza a seconda che esse siano resistenti o instabilizzanti e ponendo quest'ultima uguale ai minimi di legge, si ricava il minimo valore di T capace di stabilizzare il blocco di roccia in esame di 1 m di profondità.

Se si ipotizzano tiranti orizzontali nel caso, per semplicità, di sola forza peso agente si ottiene:

$$F = 1.3 = \frac{(W_n + T_n) \cdot \tan \varphi}{W_s + T_s}, \text{ da cui si ricava } T.$$

3.3 IMPIEGO DEI TIRANTI IN TERRENO

Come già fatto per le rocce, anche nel caso delle terre si esaminano le tipologie di dissesti che possono accadere lungo i versanti. Le terre si differenziano dalle rocce in quanto sono sensibili all'acqua presente in esse. Infatti con il termine terra si indica un materiale formato da aggregati di granuli non legati tra loro o che possono essere separati per mezzo di modeste sollecitazioni o per mezzo di un più o meno prolungato contatto con l'acqua; si tratta essenzialmente di ghiaie, sabbie, limi e argille.

Anche nel caso dei terreni è possibile riconoscere alcune principali tipologie di movimenti franosi, solitamente tutti riguardanti il movimento di coltri costituenti le porzioni meno addensate e stabili che formano il pendio.

Le frane di questo tipo sono suddivisibili in:

- frane da scivolamento planare: si verificano nella parte medio-alta dei pendii di modesta inclinazione, ma affinché il dissesto si attivi occorre essere in presenza di superfici ben definite lungo le quali sono presenti strati di argilla impermeabili che impediscono all'acqua di penetrare liberamente negli strati del suolo e, a seguito del loro rigonfiamento, creano sovrappressioni interstiziali che provocano gli smottamenti. Solitamente si verificano a seguito di abbondanti precipitazioni sommate ad alti valori di piogge cumulate;
- frane da scivolamento rotazionale: simili alle precedenti, avvengono su superfici ben definite ed in suoli con componente argillosa. Il volume coinvolto può essere anche notevole e il loro

innesco avviene a causa di eventi meteorologici di carattere breve ed intenso che saturano il terreno; le piogge cumulate favoriscono lo sviluppo di tali fenomeni anche ad elevate profondità;

- frane con movimento prevalente per colata (colamenti lenti): avvengono a causa della differente permeabilità degli strati superiori di terreno rispetto a quelli sottostanti, i quali in caso di abbondante presenza d'acqua si fluidificano fino a trasformarsi in una colata di fango assimilabile ad un liquido viscoso;
- frane da fluidificazione del suolo (colamenti rapidi o *soil slip*): anch'essi avvengono a causa della fluidificazione degli strati superficiali ma possono assumere velocità notevoli rispetto ai colamenti lenti. Un importante esempio di colamento rapido è rappresentato dai debris flow, ovvero flussi detritici che si generano in modo improvviso negli impluvi e si autoalimentano man mano che dai versanti si riversano in alveo smottamenti e frane, generando una pulsazione di piena, che giunge a valle sotto forma di colate composte da detriti solidi, vegetazione ed acqua (lave torrentizie).

Per tutti questi tipi di frana il contributo dato dall'acqua riveste un ruolo di grande importanza.

I dissesti che coinvolgono i terreni presentano, con l'eccezione dei *soil slip*, una evoluzione relativamente lenta, se paragonata a quella dei crolli di volumi rocciosi. Questo non significa che di conseguenza siano evitabili o che non sussista pericolo, ma ciò permette in genere di poter attivare un'attività di monitoraggio, prevenzione e protezione da parte degli organi competenti.

Infatti dissesti quali i colamenti lenti e gli scivolamenti possono presentare alcuni segni premonitori che è bene tener sotto controllo, quali ad esempio nuove venute d'acqua a seguito di eventi piovosi, nuove fratture sui pendii che possono far supporre la nascita di giunti di trazione, addensamenti e corrugamenti del terreno al piede di versanti (tipico segno premonitore degli scivolamenti planari) e, non meno importante, alberi d'alto fusto, pali della luce e picchetti infissi nel terreno che presentano anomale inclinazioni dovute al movimento delle coltri superficiali.

La presenza di tali segni risulta importante al fine di attuare attività preventive quali il monitoraggio dell'area, in particolar modo a seguito di eventi meteorologici avversi, in modo da prender atto dell'eventuale peggioramento della situazione e attivare, se necessario, operazioni di protezione civile, quali l'allontanamento della popolazione da centri abitati potenzialmente a rischio e il blocco del traffico stradale su tratti collocati nell'area d'espansione del dissesto o addirittura sulla stessa area in frana.

Come già visto nel caso in roccia, per stabilizzare una porzione di versante è necessario ricorrere ad interventi di tipo attivo, ossia ad elementi che, posti sul fronte in questione, siano in grado di applicare una forza tale per cui sia contrastato il volume instabile, evitando così il dissesto.

L'elemento comunemente impiegato per la stabilizzazione di pendii è in genere un manufatto di contrasto e contenimento, che può essere identificato con un muro a gravità, un muro in c.a., un rilevato in terra rinforzata o un'opera di sostegno realizzata con tecniche naturalistiche (palificata viva a doppia parete). L'azione di contrasto può essere incrementata attraverso la messa in opera di tiranti d'ancoraggio.

Nel caso di versanti sui quali sono presenti evidenti segni premonitori, ma non sono ancora accorsi eventi franosi, il tirante viene posto in opera affinché non si verifichi alcuno smottamento a seguito di eventi meteorologici avversi; ma nel caso in cui il dissesto è avvenuto, allora l'utilizzo del tirante rappresenta un'ottima soluzione per solidarizzare al meglio l'opera di ripristino con gli strati profondi del terreno più stabili. Infatti l'inserimento del tirante nel suolo ha effetti positivi in quanto si creano delle forze d'attrito tra il tirante e il terreno circostante capaci di migliorare la portata del terreno stesso ed inoltre la fondazione del tirante, penetrando in strati di suolo compatti, conferisce stabilità all'opera realizzata in superficie alla quale è ancorato il tirante stesso.

Anche in questo caso, come per le rocce, adottare un sistema attivo presenta il vantaggio di conoscere le forze coinvolte e di conseguenza di poter controllare ogni singolo elemento attraverso prove di carico.

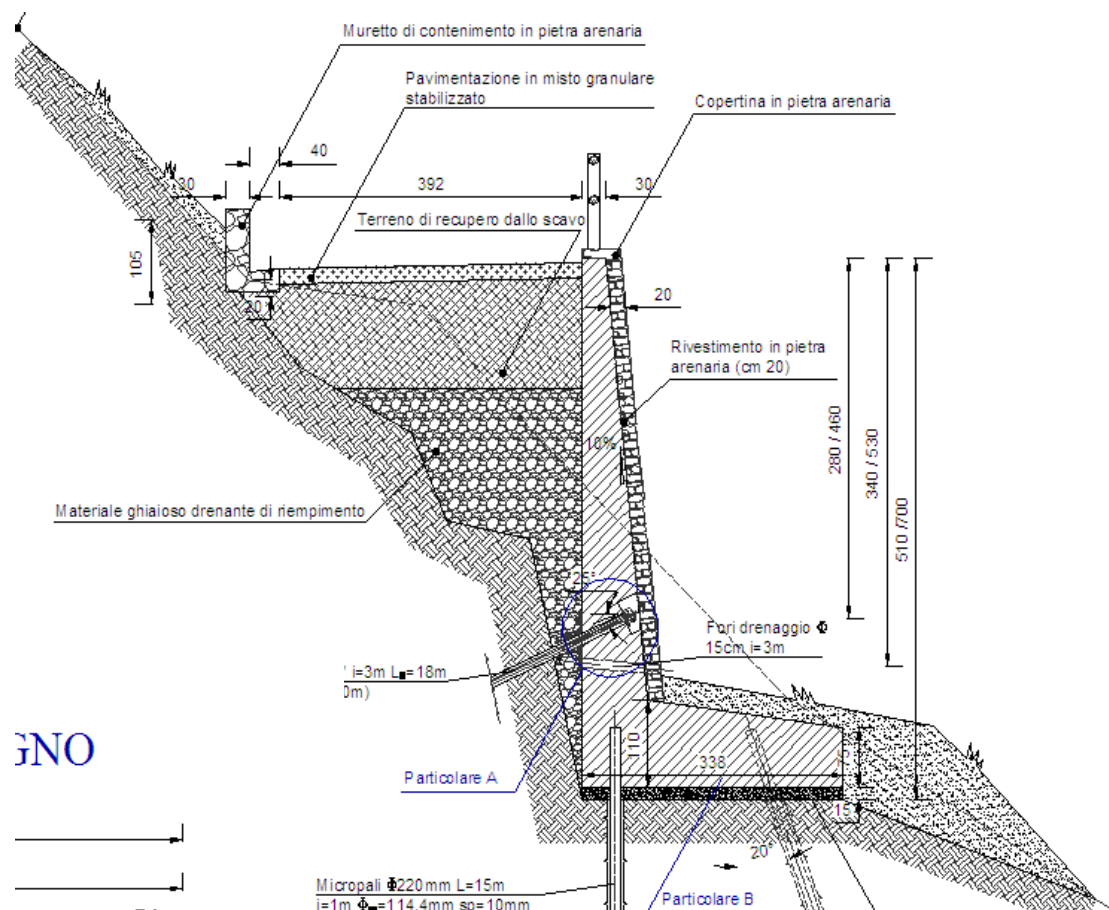


Figura 15

Esempi di utilizzo dei tiranti in terreno quale aiuto per la stabilità dell'opera in superficie.

3.3.1 DETERMINAZIONE DEL TIRO

L'approccio teorico al problema si presenta del tutto simile a quello illustrato nel caso dei tiranti in roccia, ossia bisogna esaminare tutte le forze in gioco al fine di definire il fattore di sicurezza relativo al pendio; qualora questo non soddisfi i minimi di legge, allora il fronte è da ritenersi instabile. Per riportare in condizioni di sicurezza il versante è necessario conoscere il valore della forza da applicare in modo da contrastare il volume di terreno interessato e il valore cercato è, ancora una volta, rappresentato dal tiro del tirante.

Ma a differenza del blocco di roccia, dove il piano di scivolamento è facilmente individuabile tramite la giacitura e l'inclinazione delle discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso, nei terreni definire tale superficie non è così semplice. Infatti il piano di scivolamento lungo il quale si ha la mobilitazione delle terre non sempre presenta andamento lineare e coordinate ben definite in modo da poterlo collocare facilmente nello spazio; spesso è possibile che coincida con il passaggio tra uno strato di terreno e quello successivo avente caratteristiche geologiche differenti, oppure che si trovi in corrispondenza di venute d'acqua che si possono scorgere durante scavi di sbancamento.

In alternativa ad un piano viene considerata una superficie curva quale ipotetica superficie sulla quale è possibile che avvenga lo scivolamento della porzione di terreno instabile.

Operativamente per definire tale superficie si ricorre al metodo dell'equilibrio limite, utilizzato durante lo studio della stabilità globale. Quest'ultimo, il cui risultato in termini numerici è fornito dal valore del fattore di sicurezza, verrà illustrato più dettagliatamente nel prossimo paragrafo e rappresenta una delle verifiche indicate come obbligatorie dalla normativa vigente, in quanto ha lo scopo di dimostrare il grado di stabilità del versante esaminato.

Pertanto, dopo aver definito la superficie di instabilità attraverso il metodo dell'equilibrio limite e conoscendo il corrispondente valore del fattore di sicurezza, è possibile confrontare quest'ultimo con i valori limite stabiliti dalla legge e, in caso di non conformità a tali valori, ricorrere alla definizione del tiro da conferire agli ancoraggi per riportare il pendio in condizioni di sicurezza. Per far ciò è sufficiente inserire nel modello grafico (che viene elaborato da un software), delle forze che simulino la tensione

applicata ai tiranti fino a quando, verificando nuovamente il pendio all'equilibrio limite, questo risulti stabile, ossia con un valore di FS superiore a quanto stabilito dalla normativa.

Definito il tiro opportuno per la stabilità, si può passare alla fase di progettazione del tirante, che verrà illustrata successivamente nel capitolo IV.

Metodo dell'equilibrio limite

Questa metodologia viene utilizzata per porzioni di terreno estese ove il pendio è sottoposto a deformazioni piane ed è possibile isolare un volume mediante una superficie curva. Si dice che il terreno è in equilibrio limite quando viene soddisfatta la condizione di rottura, che nell'ipotesi del criterio di Mohr-Coulomb è funzione della coesione, dell'angolo di resistenza al taglio e della pressione interstiziale. Se lungo la superficie curva la tensione tangenziale applicata, detta resistenza mobilitata, è minore della resistenza a rottura disponibile, si può determinare una condizione di equilibrio limite.

Come preannunciato, l'obiettivo di tale verifica è ricavare la superficie di instabilità più probabile e il corrispondente termine numerico che identifica il fattore di sicurezza (FS). Questo fattore è assunto per determinare la sicurezza del pendio nei confronti della rottura per taglio e viene assunto costante lungo tutta la superficie, in modo che in ogni punto di essa venga mobilitata la stessa aliquota di resistenza. Esso rappresenta il fattore per cui dividere i parametri di resistenza del terreno ed avere la rottura del pendio lungo la superficie considerata.

Il Fattore di Sicurezza, ricavato dal rapporto tra la resistenza disponibile e quella mobilitata, è determinato tramite le equazioni d'equilibrio dei corpi rigidi ossia le equazioni di equilibrio alla traslazione orizzontale e verticale ed alla rotazione rispetto ad un punto del piano delle forze.

Il problema della definizione del FS può essere risolto utilizzando il metodo dei conci: il pendio preso in considerazione può essere suddiviso in un determinato numero di elementi, ai quali è possibile associare un fattore di sicurezza. Il fattore di sicurezza minore tra quelli calcolati per ciascun concio definisce la cosiddetta superficie critica e viene assunto come rappresentativo delle condizioni di stabilità del pendio.

Per ciascuno dei conci di terreno è possibile scrivere le equazioni di equilibrio caratteristiche basate sulle forze agenti su di esso. Le incognite sono le forze di interazione tra i conci, i bracci e le forze agenti alla base (figura 16)

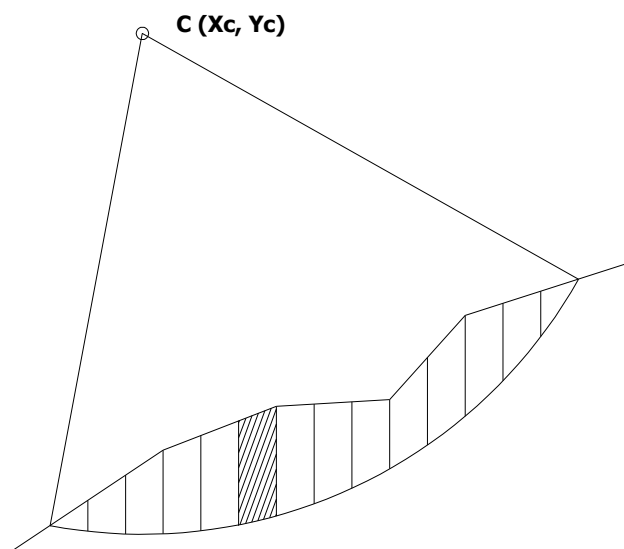


Figura 16
Suddivisione del volume instabile in n conci.

Per risolvere il problema si immagini di estrarre un singolo concio, separandolo dagli altri, e di evidenziare le azioni che i conci adiacenti generano sull'elemento in esame.

In figura 17 è illustrato nel dettaglio il singolo concio e le relative forze agenti su di esso:

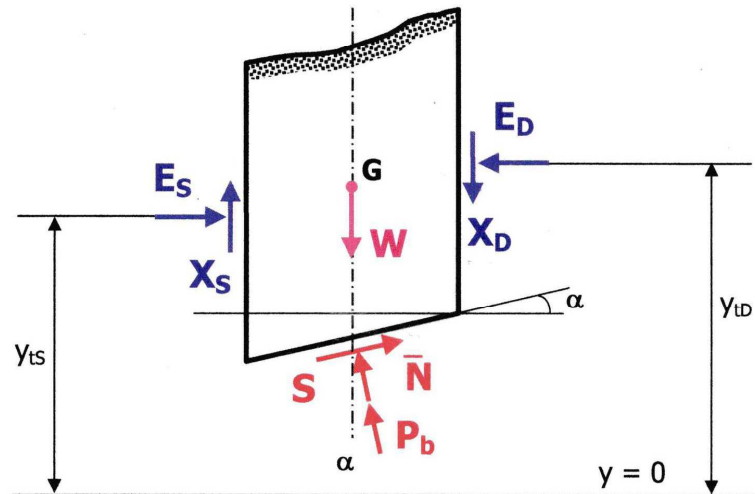


Figura 17
Dettaglio dello stato di sollecitazione dell' i-esimo concio.
(da Scavia, 2008).

in cui:

E e X: forze di compressione date dai conci adiacenti

Y: punto d'applicazione forze E;

S e N: forze del substrato; la componente S si oppone allo scivolamento mentre la normale N si oppone allo sprofondamento;

W: peso proprio del concio;

P_b: spinta dell'acqua (si considera solo la spinta idrostatica e non le Δu).

In base alle informazioni finora elencate è possibile ottenere 3 equazioni, ma essendo 8 le incognite il problema risulta essere fortemente iperstatico.

Per giungere ad una soluzione occorre operare alcune semplificazioni.

La prima può essere attuata considerando i conci nel loro insieme: si può notare che i conci si scambiano reciprocamente delle forze, le reazioni di sinistra del concio i-1 sono uguali alle reazioni del concio di destra i+1, come mostrato in figura 18.

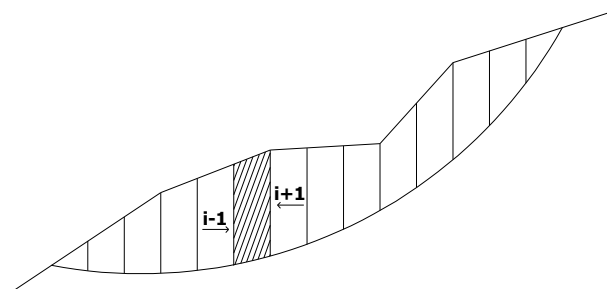


Figura 18
Scambio di reazioni tra conci adiacenti.

Da ciò si deduce che possiamo elidere queste forze riducendo le incognite a:

n-1 valori di E;

n-1 valori di X;

n-1 valori di Y;

n valori di N;

n valori di S;

ottenendo così 3N equazioni in 5n-3 incognite, dove n corrisponde al numero di conci.

Il problema così espresso si presenta ancora iperstatico, pertanto occorre introdurre ulteriori ipotesi semplificative. A tal proposito si può ricorrere alla definizione di fattore di sicurezza, già enunciata precedentemente. L'ipotesi fondamentale dell'equilibrio limite è che esiste una relazione tra S e N che si basa sulla definizione del FS:

$$F = \frac{R(n)}{S}$$

Da tale espressione è possibile ricavare l'incognita S tramite la formula inversa e definendo R(N) attraverso il Criterio di Coulomb, ottenendo:

$$S = \left(\frac{c \cdot Dx}{\cos \alpha} + N \cdot \tan \varphi \right) \cdot \frac{1}{F}$$

con:

S = valore della forza scivolante incognita;

c = coesione che agisce sulla base.

Ipotizzando inoltre che ciascun concio sia caratterizzato dal medesimo fattore di sicurezza, ossia che in ciascun punto del pendio è uguale il valore tra sforzo di taglio mobilitato e sforzo di taglio resistente, rimangono:

$$\frac{4n-2 \text{ incognite} - 3n \text{ equazioni}}{n-2 \text{ condizioni mancanti}} =$$

Il problema così ottenuto è ancora iperstatico e pertanto non risolvibile, ma nell'ambito della teoria dell'equilibrio limite sono stati sviluppati numerosi metodi che permettono di calcolare il fattore di sicurezza cercato e risolvere il sistema. Questi metodi vengono suddivisi in due grandi gruppi: i metodi rigorosi ed i metodi semplificati. Laddove i primi passano attraverso la ricerca delle n-2 equazioni mancanti, rispettando così l'equilibrio globale dei conci quelli semplificati risolvono il sistema adottando delle semplificazioni relative alle incognite presenti e basate su ragionamenti che permettano tali semplificazioni.

La definizione di tale superficie di scivolamento, invece, è il risultato di un processo iterativo del procedimento di calcolo esteso a più superfici potenzialmente "definitive" individuate a seguito di numerose prove. Questo processo viene solitamente eseguito da programmi di calcolo fornendo al software i dati geometrici del versante in oggetto, i parametri meccanici e fisici del terreno e le caratteristiche della falda presente in sito.