

# Capitolo 8

## Teoria dei blocchi

### 8.1 Introduzione

La teoria dei blocchi (*block theory*), cioè l'analisi della rimuovibilità dei blocchi, ha come scopo lo studio dei sistemi di discontinuità presenti nei massicci rocciosi, al fine di identificare i blocchi rocciosi più critici per quanto riguarda la stabilità della massa rocciosa, quando esposta in superfici libere, naturali o scavate. L'analisi è basata sui lavori di SHI (1977, 1981, 1982), GOODMAN & SHI (1985) e GOODMAN (1989, 1995), che hanno sviluppato la teoria dei blocchi e sono stati pionieri nello sviluppo e uso delle proiezioni stereografiche nello studio della rimuovibilità dei blocchi.

Nella teoria dei blocchi è necessario realizzare proiezioni stereografiche utilizzando entrambe le semisfere di proiezione. Sono quindi utilizzate le proiezioni planosferiche introdotte nel Capitolo 6.3 a pagina 102, al quale si rimanda per la loro spiegazione.

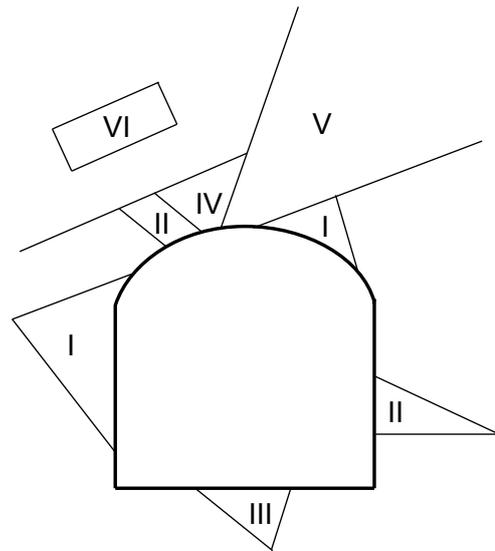
La teoria dei blocchi assume inoltre che:

- i blocchi sono indeformabili;
- i blocchi si spostano per scivolamento;
- i giunti (e ogni discontinuità in genere) sono delle superfici piane;
- la resistenza al taglio dei giunti è data dal solo angolo di attrito.

In queste dispense vengono trattati solo alcuni aspetti base della teoria dei blocchi. Per un'illustrazione esauriente e applicazioni a numerosi casi reali si rimanda ai riferimenti bibliografici sopra indicati.

### 8.2 Tipologie di blocchi

L'intersezione di numerose discontinuità creano in ammasso roccioso blocchi irregolari, tanto nella forma come nella grandezza. Quando si realizza uno scavo, molti blocchi di roccia si formano a partire dall'apertura di questo nuovo scavo. Molti di questi blocchi non possono muoversi attraverso lo spazio libero dello scavo, sia a causa delle loro forme, dimensioni, giacitura, peso, o perché il loro movimento è impedito dalla presenza di altri blocchi adiacenti. Altri blocchi, tuttavia, sono in condizioni di instabilità e possono muoversi immediatamente dopo l'apertura dello scavo o dell'eliminazione dell'impedimento al loro libero movimento. Il movimento, o la rimozione di alcuni blocchi critici, può provocare una reazione a catena, portando



**Figura 8.1** Varie tipologie di blocchi in corrispondenza di uno scavo in sotterraneo. I: blocchi chiave; II blocco chiave potenziale; III blocco stabile rimovibile; IV blocco tronco-conico o a imbuto; V blocco infinito; VI blocco interno alla massa rocciosa.

all'instabilità di blocchi adiacenti e, successivamente, al cedimento di tutto il pendio o della parete dello scavo. Per questo motivo, i blocchi più pericolosi sono anche detti *blocchi chiave*.

Intorno ad uno scavo sotterraneo possono esistere sei differenti tipi di blocchi, come mostra la Fig. 8.1.

Il blocco di tipo VI è un blocco che non ha nessuna superficie libera affiorante sul perimetro dello scavo, mentre il blocco V ha una superficie libera, ma è di carattere infinito. Nessuno di questi due blocchi può essere considerato come un blocco chiave; lo stesso si può dire del blocco IV che, a causa della sua forma ad imbuto (o tronco-conica), non può cadere nello spazio aperto senza trascinare con sé altri blocchi. Tutti gli altri blocchi sono finiti e rimovibili. Il loro movimento dipenderà, non soltanto dalla geometria, ma dalla direzione della forza risultante e dagli angoli di frizione agenti sulle superfici. Il blocco III è stabile sotto l'azione della forza di gravità; nello stesso modo blocchi del tipo II sono stabili a causa della frizione. Il blocco situato sulla sommità del tunnel ha lati paralleli, potendo muoversi soltanto in una direzione parallela ai lati e la restrizione nella libertà di movimento aumenta fortemente

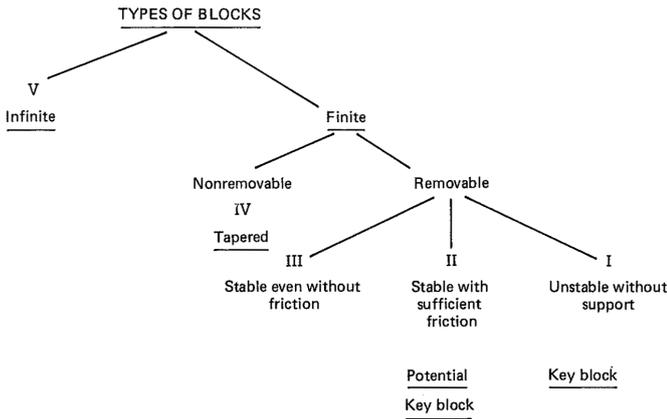


Figura 8.2 Classificazione dei possibili tipi di blocchi (GOODMAN & SHI, 1985).

la resistenza al taglio sulle loro superfici. Un altro blocco, situato nella parete laterale del tunnel, presenta un piano di base sub orizzontale ed è improbabile che si possa muovere se l'angolo di frizione presenta un valore ragionevole, a meno che le pressioni dell'acqua o di trazione cambino la direzione della risultante, dalla posizione verticale, ad una posizione rivolta verso lo spazio aperto.

I blocchi del tipo I dovranno essere considerati instabili, a meno che non siano stati fissati subito dopo essere stata fatta l'apertura. Il blocco I, situato alla sommità del tunnel, dovrà cadere, mentre quello nella parete dovrà scivolare, costituendo pertanto, dei blocchi chiave. Blocchi del tipo II possono essere considerati come blocchi chiave potenziali. La teoria dei blocchi offre un modo di classificare tutti i blocchi di roccia presenti in un massiccio nei gruppi sopra descritti (Fig. 8.2).

### 8.3 Piramide dei blocchi

Consideriamo un blocco reale delimitato da  $n$  facce, cioè da  $n$  superfici tra loro non parallele. Un blocco può essere visualizzato come l'intersezione tra i semispazi superiori ed inferiori relativi alle discontinuità che lo definiscono, cioè ogni giunto ( $i$ ) divide lo spazio in due porzioni, un semispazio superiore ( $U_i$ ) e uno inferiore ( $L_i$ ). La reciproca intersezione di queste porzioni di spazio (con  $i = 1$  a  $n$ ) determina la forma e dimensione del blocco. Un blocco, per esempio, può essere definito da  $U_1, U_2, U_3, L_4, L_5$ . Se si traslano idealmente in un punto comune tutte le superfici che delimitano un blocco, queste superfici definiscono una piramide, detta *piramide dei blocchi* (ingl. *Block Pyramid*, BP), come illustrato in Fig. 8.3. I semispazi traslati nell'origine comune sono indicati con l'apice "0", in quanto passano per l'origine comune (0, 0, 0).

### 8.4 Blocchi finiti e blocchi infiniti

Vediamo in un esempio bidimensionale il caso di un blocco infinito dato da due giunti e una superficie di scavo (Fig. 8.4), il blocco è infinito in quanto i due giunti non si intersecano all'interno dell'ammasso roccioso. Il blocco

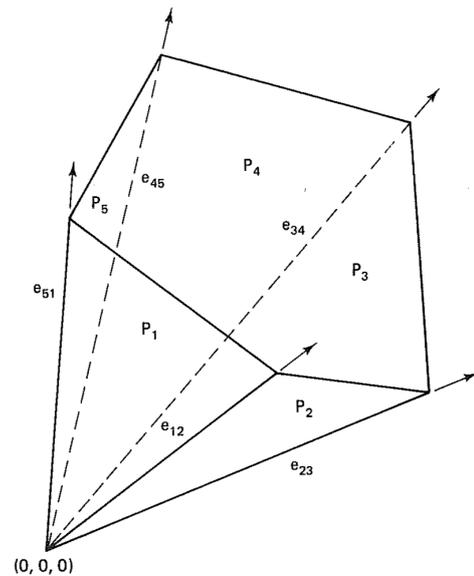


Figura 8.3 Piramide dei blocchi  $U_1^0 U_2^0 U_3^0 L_4^0 L_5^0$ .

infinito indicato con il rigato obliquo in Fig. 8.4a è dato dall'intersezione dei semispazi  $U_1, L_2, L_3$ . Le lettere "U" e "L" indicano rispettivamente il semispazio superiore (ingl. *Upper*) e inferiore (ingl. *Lower*). Supponiamo idealmente di traslare le tre superfici della Fig. 8.4a parallelamente a se stesse in un punto comune (Fig. 8.4b), individuando la piramide dei blocchi (BD) per le tre superfici. La regione comune ai semispazi  $U_1^0, L_2^0, L_3^0$ , è la piramide dei blocchi.

Vediamo ora il caso di un blocco finito (Fig. 8.4c). Traslando le tre superfici i loro rapporti sono riportati in Fig. 8.4d. È possibile vedere come in questo caso non c'è un'area comune ai semispazi  $U_1^0, L_2^0, L_3^0$ , non c'è quindi una piramide dei blocchi chiusa per le tre superfici. Si dice in questo caso che si tratta di una piramide dei blocchi "vuota".

Come introdotto da GOODMAN & SHI (1985), esiste quindi una regola per stabilire se un blocco in un ammasso roccioso è finito (*Theorem of Finiteness*):

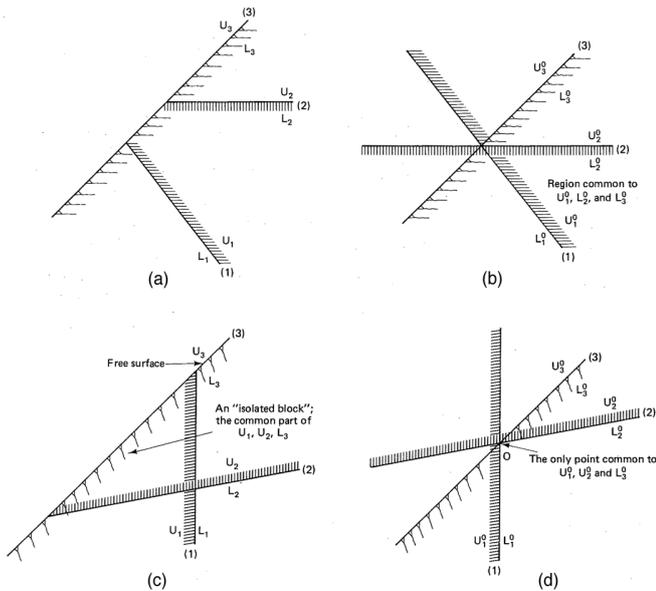
- un blocco è finito se la relativa piramide dei blocchi è vuota; un blocco è infinito se la piramide dei blocchi non è vuota.

Nella Fig. 8.4 stabilire se il blocco è finito o infinito è semplice e non necessiterebbe di altre considerazioni, ma in casi reali tridimensionali la stima non è altrettanto semplice e diventa molto importante l'uso delle proiezioni stereografiche.

Negli esempi di Fig. 8.4a e Fig. 8.4c i blocchi sono individuati da due discontinuità e dalla superficie di scavo. La piramide dei blocchi di Fig. 8.4b e di Fig. 8.4d è quindi formata da giunti e superfici di scavo.

Definiamo come:

- *piramide dei blocchi* (ingl. *Block Pyramid*, BP), come già visto, il prisma originato da tutte le superfici che delimitano un blocco, discontinuità e superfici libere, tutte traslate in un'origine comune;
- *piramide dei giunti* (*Joint Pyramid*, JP) lo spazio definito dall'intersezione dei semispazi originati dai giunti;



**Figura 8.4** (a) Blocco infinito individuato da due giunti (superfici 1 e 2) e da una superficie di scavo (superficie 3). (b) I soliti piani traslati in un'origine comune. (c) Blocco finito individuato da due giunti (superfici 1 e 2) e da una superficie di scavo (superficie 3). (d) I soliti piani traslati in un'origine comune.

- *piramide di scavo (Excavation Pyramid, EP)* lo spazio definito dall'intersezione dei semispazi originati dalle superfici di scavo.

La *piramide dei blocchi (BP)* è quindi l'intersezione della *piramide dei giunti (JP)* e la *piramide di scavo (EP)* per un particolare blocco:

$$BB = JP \cap EP \tag{8.1}$$

Per un blocco finito, la *piramide dei blocchi* è vuota. Un blocco è finito solo se:

$$JP \cap EP = \emptyset \tag{8.2}$$

Alternativamente è possibile definire una *piramide dello spazio (Space Pyramid, SP)* come l'insieme delle direzioni complementari a EP; cioè:

$$SP = \overline{EP} \tag{8.3}$$

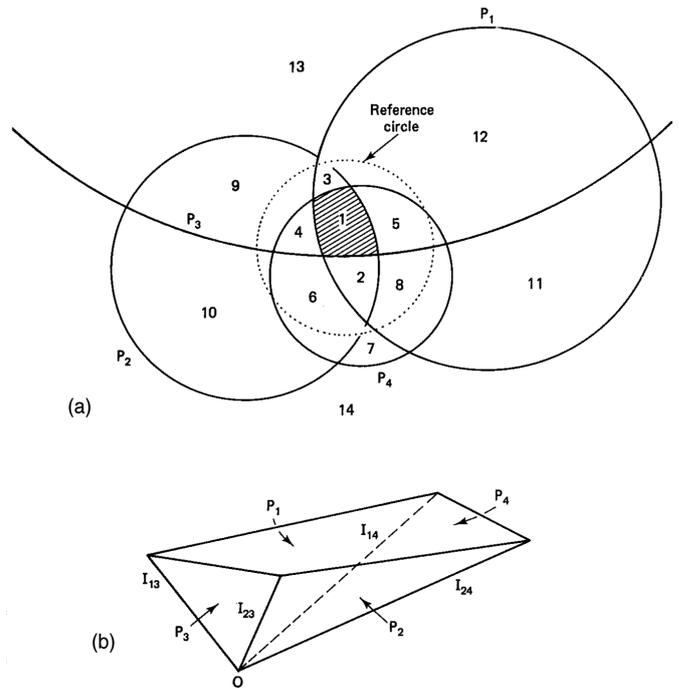
Il significato dell'Eq. 8.2 è quindi che *un blocco è finito se e solo se la piramide dei giunti (JP) è interamente contenuta piramide di scavo (EP)*, cioè se e solo se

$$SP \subset SP \tag{8.4}$$

Riesaminiamo gli esempi precedenti. In Fig. 8.4b  $U_1L_2$  definisce la *piramide dei giunti JP*,  $L_3$  è la *piramide di scavo EP* e  $U_3$  è la *piramide degli spazi SP*. Poiché JP non è incluso in SP, il blocco è infinito. In Fig. 8.4d JP è  $U_1U_2$  e SP è  $U_3$ , poiché JP è interamente incluso in SP, il blocco è finito.

### 8.5 Piramide dei giunti in proiezione stereografica

Supponiamo di misurare in un ammasso roccioso vari sistemi di giunti, ognuno rappresentato da un piano  $P_i$



**Figura 8.5** Proiezione stereografica di una piramide dei giunti, il cerchio di riferimento è indicato a tratteggio. (a) Proiezione stereografica utilizzando entrambe le semisfere di proiezione, punto focale inferiore. (b) Rappresentazione della piramide  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , l'area "1" in (a).

e idealmente trasliamo tutti i piani nel punto al centro della sfera di proiezione. Il sistema di piani  $P_i$ , con  $i = 1$  a  $n$ , taglia lo spazio e la sfera di proiezione in una serie di spazi (piramidi) tutte con origine al centro della sfera di proiezione. Ognuno di questi piani è riportato come un grande cerchio in proiezione stereografica. L'intersezione di tutti questi cerchi, come illustrato in Fig. 8.5a, genera una serie di aree in proiezione stereografica, ogni area è indicata da un numero in Fig. 8.5a. Ogni area in proiezione stereografica può essere pensata come come l'insieme dei vettori all'interno di una *piramide dei giunti (JP)*. I punti all'angolo di queste regioni (i punti intersezione di due tracce ciclografiche) rappresentano gli spigoli di queste piramidi di giunti, mentre le porzioni di tracce ciclografiche individuano le varie aree sono le facce della piramide. Per esempio, l'area "1" in Fig. 8.5a è la *piramide dei giunti* formata dall'intersezione dei semispazi  $U_1, U_2, U_3, U_4$ , gli angoli della piramide sono le quattro linee di intersezione  $I_{13}, I_{23}, I_{24}, I_{41}$  che sono gli spigoli della piramide illustrata in Fig. 8.5b.

### 8.6 Blocchi finiti e infiniti in proiezione stereografica

Consideriamo i blocchi che si originano dall'intersezione di tre giunti e una superficie di scavo, con orientazioni riportate in Tab. 8.1. La Fig. 8.6a illustra la proiezione stereografica per le quattro superfici, è riportato anche il cerchio di riferimento e la superficie di scavo (a tratteggio), le tracce ciclografiche (grandi cerchi) che rappresentano

**Tabella 8.1** Giacitura di sistemi di discontinuità in un ammasso roccioso, vedi Fig. 8.6.

	Immersione	inclinazione
Giunto 1	90	30
Giunto 2	50	65
Giunto 3	130	65
Superficie libera dello scavo	90	15

le superfici dei giunti sono riportate come linee continue. Consideriamo inizialmente solamente le superfici dei giunti. Le aree intersezione dei grandi cerchi definiscono le piramidi dei giunti. Ogni piramide è identificata da tre numeri: il numero “0” corrisponde al simbolo  $U$  visto in precedenza e definisce il semispazio sopra il piano, il numero “1” corrisponde al simbolo  $L$  visto in precedenza e definisce il semispazio al di sotto del piano. I numeri sono riportati in ordine, cioè “100” indica la piramide dei giunti sotto il piano 1, sopra il piano 2 e sopra il piano 3. Nella proiezione utilizzata, emisfera superiore con il punto focale di proiezione inferiore, la regione *sopra* un piano è all’*interno del grande cerchio*; la regione *sotto* un piano è *fuori dal grande cerchio*.

Supponiamo ora di effettuare uno scavo in galleria (un tunnel, una cava di materiale lapideo in sotterraneo, ecc.) e di avere come tetto dello scavo la superficie libera vista in precedenza (90/15). In Fig. 8.6b la superficie di scavo è stata disegnata con una linea continua e i grandi cerchi che rappresentano le discontinuità sono state tolte, lasciando solo le aree in rigato obliquo che rappresentano le piramidi dei giunti 011 e 100, cioè cioè solo le piramidi che cadono completamente all’interno o all’esterno della superficie di scavo. La piramide dello spazio SP in caso di scavo in galleria è la regione al di sotto della superficie libera, quindi in proiezione stereografica è la regione al di fuori della superficie libera di scavo 90/15. Nella Fig. 8.6b si vede come la piramide dei giunti 100 è interamente al di fuori del grande cerchio che rappresenta la superficie di scavo, quindi la JP 001 corrisponde ad un blocco finito, il blocco  $L_1U_2U_3$ . Tutte le altre regioni illustrate in Fig. 8.6a sono in parte all’interno del grande cerchio della superficie di scavo, cioè parzialmente all’interno della EP, e perciò non sono interamente contenute nella SP e di conseguenza rappresentano blocchi infiniti.

Sempre in Fig. 8.6 si può osservare come la regione 011, che giace interamente all’interno del grande cerchio della superficie di scavo, determina un blocco che è finito ed è al di sotto di una superficie di scavo, cioè un blocco che è finito e che si trova al di sotto dello scavo che ha come pavimento la superficie libera 90/15. Quando i blocchi si formano al di sotto della superficie libera la SP diventa la regione al di sopra della superficie di scavo e quindi in proiezione stereografica l’area all’interno del grande cerchio della superficie di scavo. Dalla figura si vede inoltre che la piramide 001 è l’unica JP contenuta nella SP al di sopra della superficie libera.

La Fig. 8.6c mostra una sezione attraverso la parte al di sopra della superficie di scavo, guardando verso sud, evidenziando il blocco 001; la Fig. 8.6d mostra una rap-

presentazione tridimensionale del blocco. Questo blocco è potenzialmente pericoloso per l’escavazione, è un blocco di tipo 1, finito, non bloccato e probabilmente instabile senza interventi di sostegno (a meno di elevati angoli di frizione con i blocchi adiacenti).

Quello che abbiamo visto finora è importante per determinare la geometria dei blocchi e pianificare interventi di sostegno, questo però non è sufficiente per stabilire se un blocco è rimuovibile. Questo è illustrato nel prossimo capitolo.

## 8.7 Teorema della rimuovibilità dei blocchi

Un blocco finito e convesso è rimuovibile in funzione della sua forma e dell’orientazione e forma della superficie di scavo. Le condizioni necessarie e sufficienti per la rimuovibilità o la non rimuovibilità di un blocco finito sono stabilite dal seguente *Teorema della rimuovibilità dei blocchi* (GOODMAN & SHI, 1985):

Un blocco è rimuovibile se la sua piramide dei blocchi BP è vuota e la sua piramide dei giunti JP non è vuota. Un blocco non è rimuovibile (*tapered*) se la sua piramide dei blocchi è vuota e anche la sua piramide dei giunti è vuota.

Vediamo l’applicazione di questo teorema con un semplice caso bidimensionale. La Fig. 8.7a mostra una serie di blocchi definiti da sistemi di giunti da una superficie libera di scavo (superficie 5). Consideriamo il blocco A, determinato da  $U_1U_2U_4L_5$ . JP per questo blocco è  $U_1^0U_2^0U_4^0$ ; come evidenziato in Fig. 8.7b c’è una regione comune individuata da questi semispazi e perciò  $JP_A$  non è vuota. Allo stesso modo si vede che la piramide dei blocchi  $U_1^0U_2^0U_4^0L_5^0$  è vuota. In base alla prima parte del teorema della rimuovibilità il blocco A è rimuovibile perché  $JP_A$  non è vuota e  $BP_A$  è vuota.

Consideriamo il blocco B in Fig. 8.7a, individuato dai semispazi  $L_1U_2U_3L_5$ . La sua  $JP_B$  è  $L_1^0U_2^0U_3^0$ ; il solo punto comune ai tre semispazi è l’origine (Fig. 8.7c). Quindi la  $JP_B$  è vuota e anche la  $BP_B$  è vuota. Di conseguenza, per la seconda parte del teorema della rimuovibilità, il blocco B non è rimuovibile. Poiché si tratta di un blocco finito, significa che il blocco è bloccato.

### Uso delle proiezioni stereografiche

Vediamo ora come applicare il teorema della rimuovibilità dei blocchi a casi tridimensionali facendo uso delle proiezioni stereografiche.

Ricordiamo che la piramide dei giunti per una certa piramide dei blocchi si rappresenta in proiezione stereografica come una serie di regioni racchiuse da tracce ciclografiche. Se abbiamo  $n$  superfici di discontinuità non parallele ci sono  $2^n$  possibili blocchi creati dall’intersezione dei piani. È possibile dimostrare (vedi GOODMAN & SHI, 1985) che quando  $n > 3$  non tutte le possibili regioni possono essere rappresentate in proiezione stereografica, ma le possibili

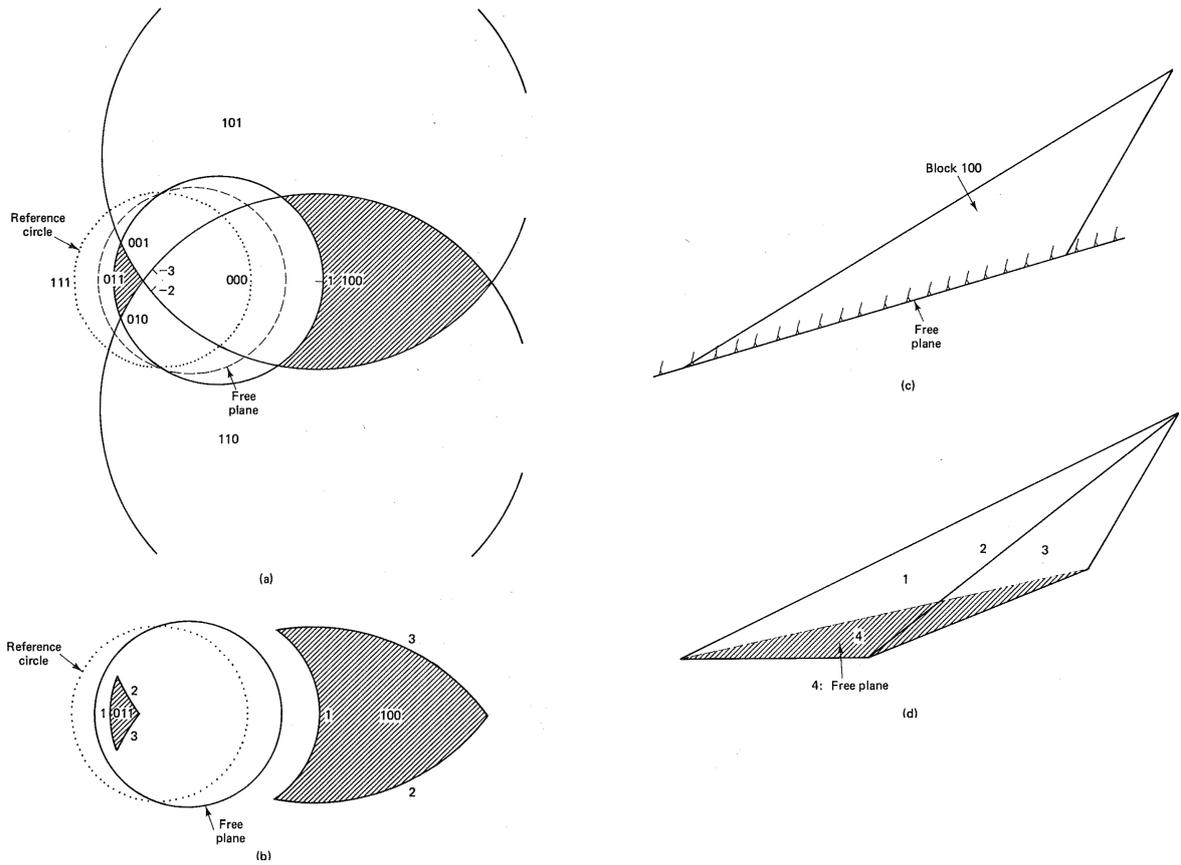


Figura 8.6 Valutazione del tipo di blocco (finito/infinito) in proiezione stereografica. Giacitura delle superfici in Tab. 8.1; punto focale di proiezione inferiore. Le piramidi dei giunti JP sono indicate con rigato obliquo.

regioni che possono essere rappresentate ( $N_R$ ) sono :

$$N_R = n(n - 1) + 2 \tag{8.5}$$

In proiezione stereografica possono essere rappresentati linee e piani nello spazio, ma non si possono rappresentare punti nello spazio. Se un blocco è finito, la sua piramide dei blocchi BP è vuota. Quando tale blocco è individuato completamente da semispazi definiti dalle discontinuità, la piramide dei giunti JP è vuota. Una piramide dei giunti vuota significa che non ha lati che la definiscono e quindi non può essere rappresentata in proiezione stereografica. In altre parole, il solo punto in comune ai semispazi che definiscono una piramide dei giunti vuota è l'origine (0, 0, 0) che essendo un punto non può essere rappresentata in proiezione stereografica. Questo è molto importante e implica che: *le regioni che sono assenti dalla proiezione stereografica sono le piramidi dei blocchi che corrispondono a blocchi finiti.* Il numero ( $N_T$ ) di questi blocchi finiti individuati da  $n$  giunti non paralleli è:

$$N_T = 2^n - [n(n - 1) + 2] \tag{8.6}$$

Consideriamo il caso di un ammasso roccioso in cui sono presenti quattro discontinuità la cui giacitura è riportata in Tab. 8.2. La proiezione stereografica di queste superfici è in Fig. 8.8. Poiché  $n$  è uguale a 4,  $N_R = 14$  e  $N_T = 2$ . Ognuna di queste piramidi originata dall'intersezione delle quattro superfici è identificata da un numero a quattro cifre in Fig. 8.8, da un'analisi della figura si nota come solo

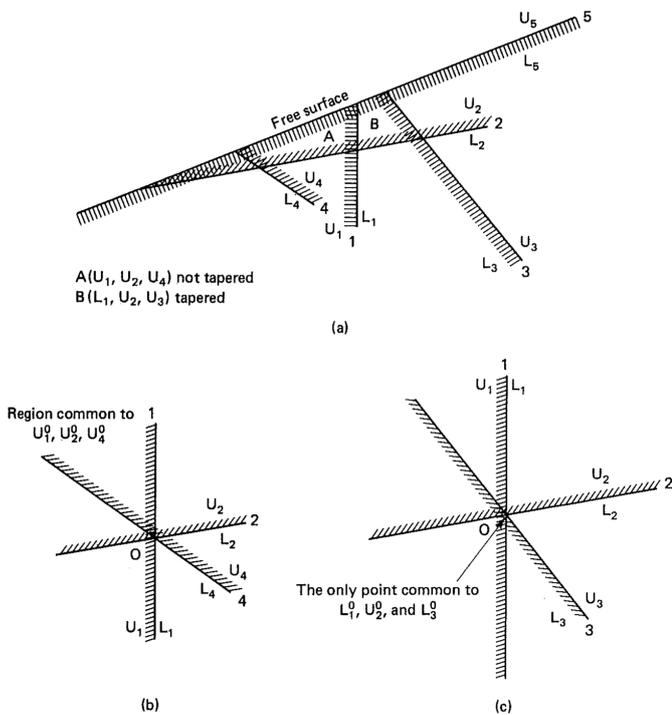
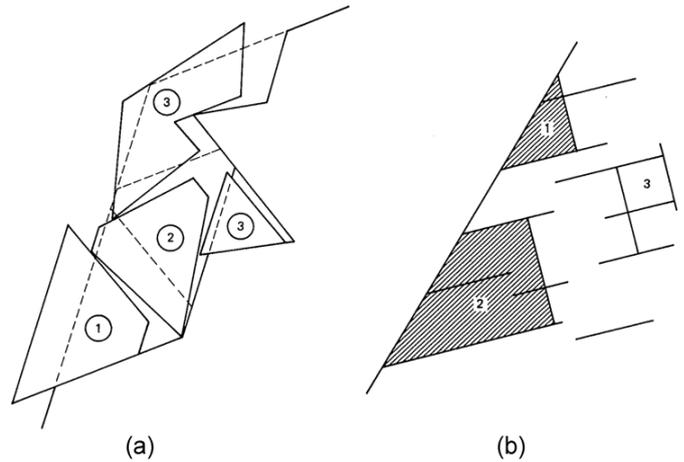


Figura 8.7 Applicazione del teorema della rimuovibilità dei blocchi: esempio bidimensionale.

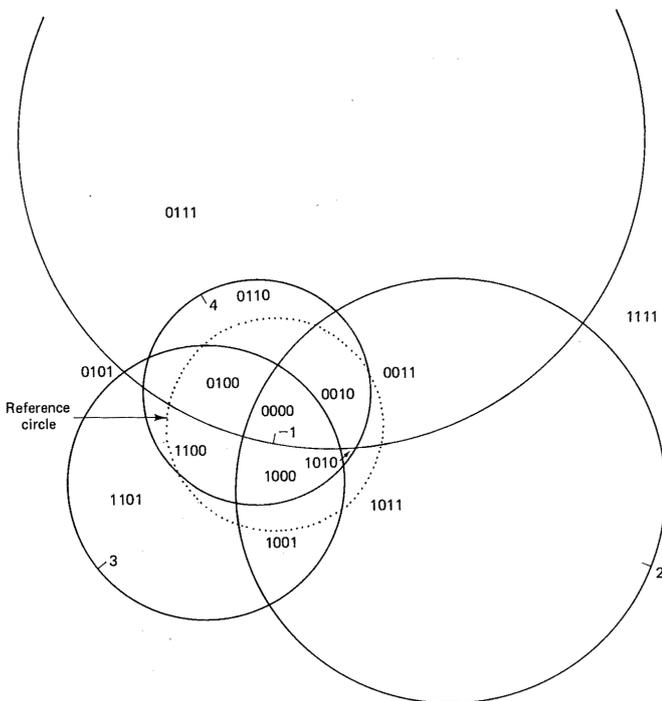
**Tabella 8.2** Giacitura di sistemi di discontinuità in un ammasso roccioso; vedi Fig. 8.8.

Giunto	Immersione	inclinazione
1	10	70
2	110	60
3	230	40
4	330	20



**Figura 8.9** (a) Cedimento progressivo di un ammasso roccioso. (b) Tipi di blocchi in un ammasso. 1:blocco chiave, 2:blocco rimuovibile con facce parallele, 3:blocco delimitato completamente da giunti.

14 regioni appaiono in proiezione: le due che mancano sono la 0001 e la 1110. Questi due blocchi finiti sono il blocco  $U_1U_2U_3L_4$  e il blocco  $L_1L_2L_3U_4$ . Quando uno di questi due blocchi è tagliato da una superficie libera (superficie di scavo), definendo così dei blocchi le cui piramide dei blocchi è la piramide dei giunti 0001 o 1110 più la superficie libera, il blocco risultante sarà bloccato e non rimuovibile dall'ammasso roccioso. Blocchi che sono "bloccati" sono molto importanti perché non possono essere blocchi chiave e non possono cadere in scavi in gallerie o tunnel.



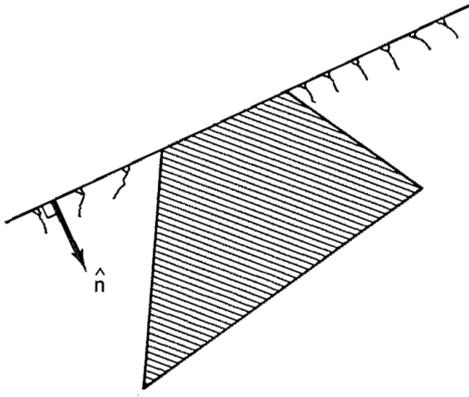
**Figura 8.8** Proiezione stereografia, punto di proiezione inferiore, delle discontinuità di Tab. 8.2.

### 8.8 Teoria dei blocchi per scavi superficiali

Scavi superficiali si realizzano comunemente quando si ha necessità di creare spazi per costruzioni, oleodotti e condutture in genere, canali, sedi ferroviarie e stradali, fondazioni per ponti e dighe, cave a cielo aperto, ecc. Inoltre si realizzano nelle fasi iniziali di opere di scavo che poi si realizzeranno in sotterraneo (gallerie stradali, condutture, cave, ecc.).

Come abbiamo visto nel Capitolo 7 a pagina 109, gli ammassi rocciosi possono presentare differenti modalità di cedimento, che spesso nella realtà possono verificarsi contemporaneamente partendo dal cedimento iniziale di un blocco, detto *blocco chiave*. Nell'esempio di Fig. 8.9a un versante ha un cedimento con movimento di quattro blocchi, ognuno con meccanismo differente. È evidente che il movimento potrebbe essere impedito se il blocco 1 fosse bloccato (blocco chiave).

Blocchi chiave potenziali differiscono da blocchi di giunti (*joint blocks*), cioè blocchi delimitati completamente da giunti. I blocchi chiave, come per esempio il blocco 1 in Fig. 8.9b, hanno una faccia che è necessariamente rappresentata dalla superficie libera dello scavo, mentre al contrario i blocchi di giunti, come il blocco 3 in Fig. 8.9b, non la possiedono. Se un blocco di giunti è raggiunto e tagliato da una superficie di scavo esso diventa un blocco bloccato non rimuovibile oppure un blocco rimuovibile con



**Figura 8.10** Blocco con forma “ad imbuto”, bloccato, in un ammasso roccioso.

una o più coppie di facce parallele come il blocco 2 in Fig. 8.9b. Un blocco con facce parallele ha minori possibilità di movimento e quindi raramente sono blocchi chiave durante l’escavazione.

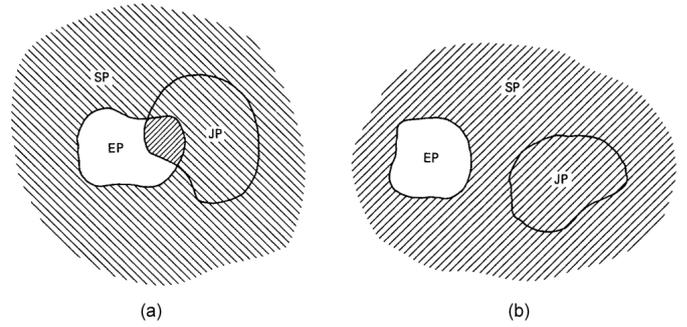
L’individuazione dei blocchi chiave durante l’escavazione inizia con valutazioni di tipo geometrico, partendo dalle giaciture dei sistemi di giunti presenti. Si produrrà quindi una serie di blocchi ognuno con indice  $D_B$  come illustrato nel Capitolo 8.6 (es. 0110). Questo codice può avere come indice le cifre 0, 1, 2, 3. La  $i$ -esima cifra dell’indice  $D_B$  sarà:

- 0: se il blocco è formato con l’intersezione del semispazio  $U_i$ , cioè il semispazio superiore del piano  $i$ ;
- 1: se se il blocco è formato con l’intersezione del semispazio  $L_i$ , cioè il semispazio inferiore del piano  $i$ ;
- 2: se né  $U_i$  né  $L_i$  si intersecano con gli altri semispazi, cioè il giunto  $i$ -esimo non è una faccia del blocco;
- 3: se sia  $U_i$  che  $L_i$  si intersecano con gli altri semispazi, cioè il blocco ha due facce parallele rappresentate dal giunto  $i$ -esimo.

Dopo aver identificato i codici per i potenziali blocchi chiave, ulteriori valutazioni saranno necessarie su questi blocchi, quali spaziatura dei giunti, volume dei giunti, ecc. Risultato finale sarà la predisposizione di opere di sostegno e di rinforzo (tiranti, ecc.) sui blocchi chiave per impedire il cedimento totale dell’ammasso roccioso e pianificazione dei fronti di scavo (orientazione, inclinazione) per minimizzare il pericolo di crolli o cedimenti ed aumentare il grado di sicurezza di uno scavo.

### 8.8.1 Condizioni per la rimuovibilità di blocchi intersecanti superfici di scavo

Consideriamo in questo capitolo blocchi che intersecano una superficie di scavo. Inizialmente supponiamo che la superficie di scavo sia una singola superficie planare,  $P_i$ , la cui normale,  $\hat{v}_i$  è diretta verso l’interno dell’ammasso roccioso, come illustrato in Fig. 8.10. Scrivendo quindi  $P_i(\hat{v}_i)$  si intende “il semispazio del piano  $P_i$  che contiene il vettore  $\hat{v}_i$ ”. Se si assegna l’indice  $i$  alla superficie di scavo, la piramide di scavo EP e la piramide degli spazi



**Figura 8.11** (a) Rappresentazione schematica (non proiezione stereografica) delle condizioni necessarie per un blocco convesso infinito. (b) Rappresentazione schematica delle condizioni necessarie per un blocco convesso finito.

SP saranno:

$$\begin{aligned} EP &= U_i \text{ oppure } L_i \\ SP &= L_i \text{ oppure } U_i \end{aligned} \tag{8.7}$$

o anche

$$\begin{aligned} EP &= P_i(\hat{v}_i) \\ SP &= P_i(-\hat{v}_i) \end{aligned} \tag{8.8}$$

La maggior parte dei blocchi che intersecano una superficie libera sono infiniti o bloccati.

#### Blocchi infiniti

In base a quanto visto in precedenza (*Theorem of finiteness*, Capitolo 8.4 a pagina 128) un blocco infinito deve avere una piramide dei blocchi (BP) non vuota:

$$BP \neq \emptyset \tag{8.9}$$

poiché

$$BP = JP \cap EP \tag{8.10}$$

e il criterio per un blocco per essere infinito è

$$JP \cap EP \neq \emptyset \tag{8.11}$$

(il simbolo  $\cap$  indica intersezione, il simbolo  $\emptyset$  un insieme vuoto).

Come illustrato schematicamente in Fig. 8.11a, la piramide di scavo EP più la piramide degli spazi SP, individua tutto lo spazio. Quando la Eq. 8.11 è verificata JP giace solo parzialmente nella SP, il che significa che non è contenuta in SP:

$$JP \not\subseteq SP \tag{8.12}$$

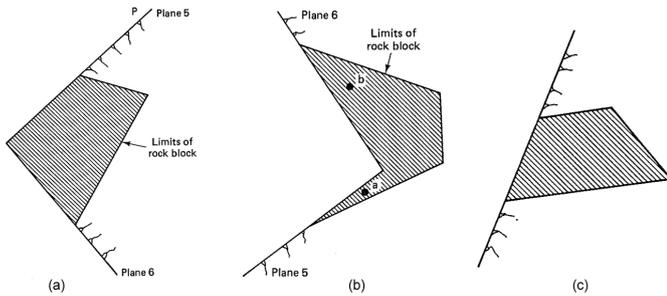
#### Blocchi finiti

Per essere finito, un blocco convesso con una faccia rappresentata da una superficie libera deve avere una piramide dei blocchi vuota, cioè:

$$BP = \emptyset \tag{8.13}$$

dalla Eq. 8.10, analogamente si ha

$$JP \cap EP = \emptyset \tag{8.14}$$



**Figura 8.12** Esempi di blocchi chiave potenziali. (a) Esempio nel caso di un pendio convesso. (b) Esempio nel caso di un pendio concavo. (c) Blocco delimitato da giunti paralleli.

L'Eq. 8.14 è vera se e solo se JP giace fuori della EP, il che significa che è completamente contenuta nella SP (Fig. 8.11)b, oppure:

$$JP \subset SP \tag{8.15}$$

L'Eq. 8.14 e l'Eq. 8.15 sono equivalenti, come l'Eq. 8.11 e l'Eq. 8.12. L'Eq. 8.12 e l'Eq. 8.15 saranno utilizzate con le proiezioni stereografiche.

**Blocchi non rimuovibili**

Le condizioni per un blocco per essere non rimuovibile sono state viste nel Capitolo 8.7 a pagina 130. Se un blocco è finito, la sua piramide dei blocchi vuota, mentre la condizione di non rimuovibilità stabilisce che la piramide dei giunti deve essere ugualmente vuota. I blocchi che risultano essere bloccati in un ammasso roccioso sono quelli che soddisfano contemporaneamente:

$$JP \cap EP = \emptyset$$

e

$$JP = \emptyset \tag{8.16}$$

L'Eq. 8.16 è la condizione per un blocco per essere finito. Un blocco che risulta essere bloccato è rappresentato in Fig. 8.11b. Si noti che il blocco deve essere finito in base alla giacitura dei giunti, cioè senza considerare la superficie di scavo.

**Blocchi rimuovibili**

Per essere un blocco chiave potenziale, un blocco convesso deve essere finito e rimuovibile (Fig. 8.12a). In base a quanto visto finora, tale blocco deve soddisfare l'Eq. 8.14 e l'Eq. 8.15. Inoltre, siccome non è bloccato, non deve soddisfare l'Eq. 8.16.

Le condizioni di un blocco per essere rimuovibile sono quindi:

$$JP \neq \emptyset$$

e

$$JP \cap EP = \emptyset \tag{8.17}$$

oppure

$$JP \subset SP$$

**8.8.2 Identificazione di blocchi chiave in proiezione stereografica**

Le proiezioni stereografiche offrono soluzioni grafiche per determinare i blocchi infiniti, bloccati o rimuovibili per un insieme di sistemi di discontinuità e superfici di scavo. È importante ricordare ancora che negli esempi che seguono i sistemi di discontinuità e le superfici di scavo sono riportate come tracce ciclografiche di grandi cerchi, utilizzando il punto focale di proiezione inferiore;  $U_i$  è l'area all'interno del cerchio  $i$ , il suo codice è 0.  $L_i$  è l'area fuori dal cerchio  $i$ , il suo codice è 1.  $U_i$  e  $L_i$  sono i due semispazi. JP, se non vuota, è l'intersezione dei semispazi dei giunti, e quindi in proiezione stereografica occupa una regione all'interno dei grandi cerchi.

Gli esempi che seguono utilizzano i giunti e superfici di scavo riportati in Tab. 8.3.

**Pendio formato da un solo piano**

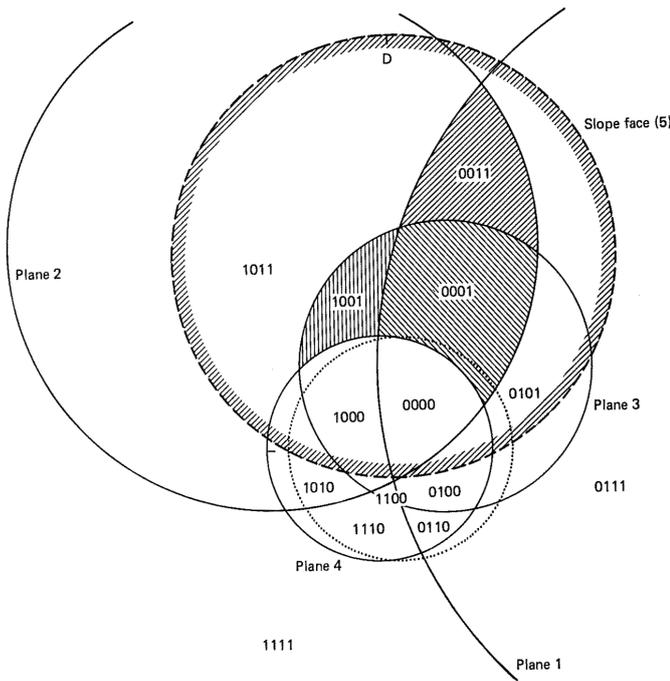
In Fig. 8.13 sono riportati 4 giunti di frattura e una superficie di scavo in proiezione stereografica, la superficie 5 in Tab. 8.3. L'ammasso roccioso è quindi nel semispazio inferiore del piano 5. Quindi  $EP = L_5$  e  $SP = U_5$ . In altre parole, EP corrisponde all'area all'esterno del cerchio 5, mentre SP corrisponde all'area all'interno del cerchio 5. In Fig. 8.13 le 4 superfici dei giunti si intersecano e creano regioni ognuna delle quali corrisponde ad una JP. Ognuna di queste regioni è esterna o interna rispetto ad un grande cerchio, e ad essa può essere assegnato un codice. Nella Fig. 8.13 le regioni sono indicate con tale codice di quattro cifre.

In accordo con l'Eq. 8.12, i blocchi infiniti devono soddisfare il criterio che la JP non è contenuta nella SP. Questo è vero per qualsiasi regione che non è interamente contenuta all'interno del cerchio del piano 5. In Fig. 8.13 è possibile vedere come i blocchi infiniti corrispondono alle JP con codici: 1111, 0111, 1110, 1011, 0110, 1010, 1100, 0101, 0100, 0000 e 1000.

I blocchi di forma tronco-conica bloccati sono quelli che soddisfano il criterio  $JP = \emptyset$ . Questo significa che le JP dei blocchi bloccati non sono presenti in proiezione stereografica. Nel caso di 4 giunti, ognuno dei quali origina due semispazi, il numero delle possibili intersezioni è 16. Dall'analisi di Fig. 8.13 si vede come le regioni presenti siano 14, quindi 2 intersezioni tra semispazi non sono presenti in proiezione. Le due intersezioni mancanti sono quelle con i codici 1101 e 0010. I due blocchi bloccati sono quelli le cui JP sono 1101 e 0010.

**Tabella 8.3** Giunti e superfici libere di scavo utilizzate in Fig. 8.13.

	Giunti, superfici di scavo	Immersione	Inclinazione
1	Giunto	80	75
2	Giunto	330	65
3	Giunto	30	40
4	Giunto	270	10
5	Superficie di scavo	0	60
6	Superficie di scavo	90	80



**Figura 8.13** Proiezione stereografica dei giunti riportati in Tab. 8.3. È riportata solo la superficie di scavo 5 (0/60).

I blocchi rimuovibili soddisfano due condizioni:  $JP \neq \emptyset$  e anche  $JP \subset SP$ . Ogni JP con un codice riportato in proiezione stereografica è non vuoto e quindi soddisfa il primo criterio. Il secondo richiede che un blocco rimuovibile abbia una JP che cade interamente al cerchio che corrisponde al piano 5. Dall'analisi di Fig. 8.13 si vede che i codici che soddisfano questo criterio sono 0011, 1001 e 0001. Blocchi chiave potenziali saranno quindi quelli le cui JP corrispondono a uno di questi tre codici.

**Pendio formato da due piani – versante convesso**

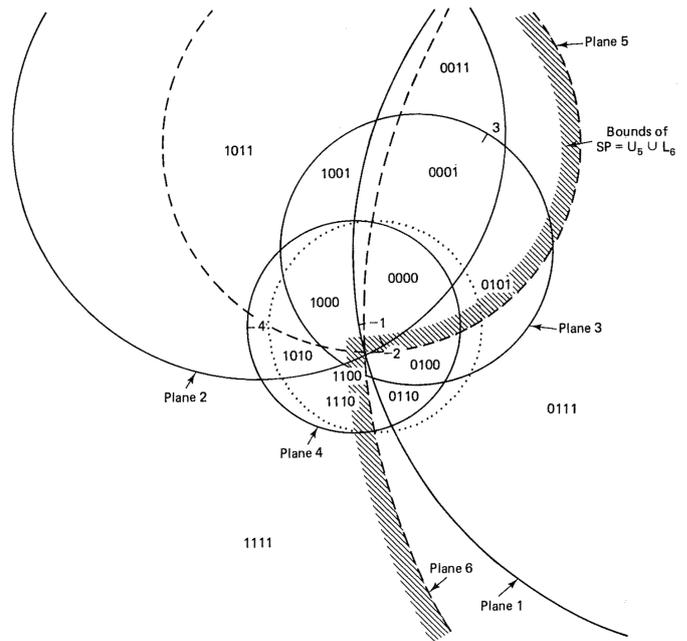
Consideriamo ora un blocco rimuovibile nel caso più comune di un versante, in cui il pendio non è rappresentato da un piano, ma da due piani, con una forma convessa. È un caso frequente, per esempio, in aree di cava in cui sono presenti due fronti di scavo con differente orientazione.

Consideriamo inizialmente il caso in cui l'ammasso roccioso è l'intersezione della parte inferiore del piano 5 e la parte superiore del piano 6. Come illustrato in Fig. 8.12a l'intersezione dei due fronti di scavo produce una forma convessa della superficie libera. Questi fronti di scavo sono riportati nella proiezione stereografica di Fig. 8.14, assieme alle superfici dei giunti. Le regioni intersezioni dei giunti hanno gli stessi codici visti in precedenza in Fig. 8.13, in quanto l'introduzione di un'ulteriore superficie di scavo non cambia i codici delle JP, in quanto queste ultime sono definite dall'intersezione delle superfici dei giunti. Poiché l'ammasso roccioso è l'intersezione di  $L_5$  e  $U_6$ , si ha

$$EP = L_5 \cap U_6$$

$$\text{e } SP = U_5 \cup U_6$$

dove  $A \cup B$  indica l'unione di A e B.



**Figura 8.14** JP nel caso di giunti non ripetuti e non paralleli; SP per un versante convesso formato da due superfici libere, il piano 5 e 6.

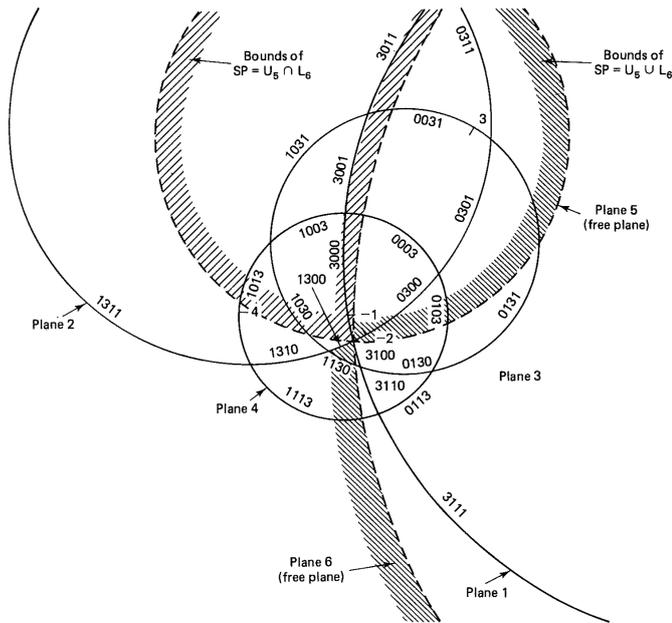
In Fig. 8.14 i limiti della SP sono indicati con un rigato obliquo, nella parte interna della SP. I blocchi infiniti corrispondono alle regioni delle JP che non giacciono completamente all'interno della SP. Dall'analisi di Fig. 8.14 si vede come esse siano la 0110, 0111, 0100, 0101, 1111, 1110, 0000, 1100 e 1000. Si noti come:

- i blocchi non rimuovibili sono quelli le cui JP non sono presenti in proiezione stereografica; poiché la proiezione delle JP è indipendente dalle superfici di scavo, i blocchi bloccati saranno gli stessi dell'esempio precedente, cioè 1101 e 0010;
- i blocchi rimuovibili sono quelli le cui JP sono completamente all'interno della SP; essi sono 1011, 1001, 0011, 0001 e 1010.

**Blocco rimuovibile – giunti paralleli**

Blocchi rimuovibili che sono costretti a muoversi tra superfici di giunti parallele tra loro sono più stabili, in quanto le possibilità di questi blocchi sono limitate. La Fig. 8.12c mostra un esempio di tale blocco; se il giunto che si ripete è il giunto 1, le possibili JP saranno 3000, 3001, 3010, ecc. Se una di queste JP identifica una regione in proiezione stereografica, la regione deve trovarsi lungo il grande cerchio del piano 1. Supponiamo che la superficie di scavo è il piano 5, con  $EP = L_5$ . In questo caso SP è la regione all'interno del cerchio del piano 5 (Fig. 8.15).

Le JP corrispondenti alla ripetizione del giunto 1 sono non-vuote se esse sono segmenti (o porzioni) del cerchio del giunto 1. Segmenti particolari corrispondono ad un blocco finito se e solo se essi giacciono interamente all'interno della SP. Codici che non corrispondono a porzioni del cerchio 1 sono blocchi non rimuovibili e quelli che sono interamente o parzialmente al di fuori della SP corrispondono a blocchi infiniti. In Fig. 8.15 tutti i segmenti del giunto 1 sono stati



**Figura 8.15** Piramidi dei giunti (JP) per un giunto che si ripete nell'ammasso roccioso e relative SP per pendii concavi e convessi (non discusso nel testo).

indicati con il relativo codice delle JP. I blocchi infiniti, non rimuovibili e rimuovibili con  $EP = L_5$  sono stati individuati. I blocchi infiniti sono il 3111, 3110 e 3000. I blocchi non rimuovibili sono il 3010 e 3101. Blocchi rimuovibili sono il 3011 e 3001.

La solita procedura di analisi può essere ripetuta nel caso il giunto 2 sia il giunto che si ripete, poi per il giunto 3 ed infine per il giunto 4. I risultati sono riportati in Tab. 8.4.

Consideriamo ora un blocco delimitato da giunti paralleli in un ammasso roccioso, in un versante di scavo convesso delimitato da due superfici libere (piano 5 e piano 6). La EP sarà formata dall'intersezione di  $L_5$  e  $U_6$ . I codici delle JP non sono influenzati dalla scelta della SP, perciò la lista dei blocchi non rimuovibili rimane invariata. Però la suddivisione in blocchi in infiniti e rimuovibili è cambiata. La Tab. 8.5 mostra la lista dei blocchi infiniti e rimuovibili come determinata in Fig. 8.15 con  $SP = U_5 \cup L_6$ .

**Blocchi rimuovibili con due sistemi di giunti paralleli**

Blocchi delimitati da due differenti famiglie di giunti paralleli sono ancora più stabili rispetto al caso esaminato in precedenza. Abbiamo visto che una piramide dei giunti non vuota per un blocco delimitato da due facce parallele (appartenenti ad una famiglia di giunti) è un arco di grande cerchio, come illustrato in Fig. 8.15. Nel caso di due famiglie di giunti la piramide dei giunti non vuota sarà rappresentata dal punto intersezione dei due archi che rappresentano le due famiglie di giunti. Il codice per tale JP contiene il numero "3" in due posizioni. La Fig. 8.16 mostra tutte le JP corrispondenti a blocchi di questo tipo (sempre per il sistema di giunti di Tab. 8.3).

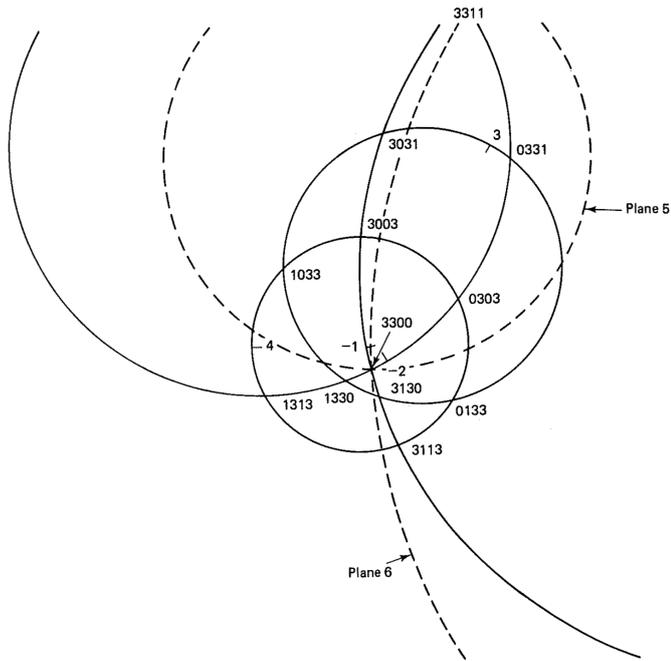
Consideriamo inizialmente il solo piano 5 come superficie libera, con  $EP = L_5$  e  $SP = U_5$ , l'analisi di Fig. 8.16

**Tabella 8.4** Tipi di blocchi per ripetizione del giunto 1, 2, 3, 4 e superficie libera di escavazione 5 ( $EP = L_5$ ).

Giunto ripetuto	Blocchi		
	Infiniti	Non rimuovibili	Rimuovibili
1	3111	3010	3011
	3110	3101	3001
	3100		
	3000		
2	3000	0310	0301
	1300	1301	0311
	1310		
	1311		
3	0131	03030	0031
	0130	1131	1031
	1130		
	1030		
4	0103	0013	0003
	0113	1103	1003
	1113		
	1013		

**Tabella 8.5** Tipi di blocchi per ripetizione dei giunti 1, 2, 3, 4, in un versante convesso rappresentato dalle superfici di scavo 5 e 6 ( $EP = L_5 \cap U_6$ ).

Giunto ripetuto	Blocchi	
	Infiniti	Rimuovibili
1	3111	3011
	3110	3001
	3100	3000
2		1300
	1310	0311
	1311	0301
3		0300
	1130	0031
	0130	1030
4	0131	1031
4	1113	0003
	0113	1003
	0103	1013



**Figura 8.16** Piramidi dei giunti nel caso di due sistemi di giunti paralleli.

**Tabella 8.6** Tipi di blocchi nel caso di due famiglie di giunti paralleli.

Giunto ripetuto	Blocchi		
	Infiniti	Non rimuovibili	Rimuovibili
1, 2	3300	3301, 3310	3311
1, 3	3130	3030, 3131	3031
1, 4	3113	3013, 3103	3003
2, 3	1330	0330, 1331	0331
2, 4	1313	0313, 1303	0303
3, 4	0133	0033, 1133	1033

permette di stabilire quali dei blocchi corrispondenti alle JP sono infiniti, non rimuovibili o rimuovibili. I risultati sono riportati in Tab. 8.6.



# Bibliografia

- BARTON N. & CHOUBEY V. (1977) - *The shear strength of rock joints in theory and practice*. Rock Mechanics and Rock Engineering, **10**, 1–54.
- BARTON N., LIEN R. & LUNDE J. (1974) - *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. Rock Mechanics and Rock Engineering, **6** (4), 189–236.
- BELL F.G. (2004) - *Engineering Geology and Construction*. CRC Press, 797 pp.
- BIENIAWSKI Z.T. (1974) - *Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunnelling*. In: *Proc. 3th International Congress on Rock Mechanics, ISRM*, vol. 11A, pp. 27–32. Denver.
- BIENIAWSKI Z.T. (1989) - *Engineering Rock Mass Classification*. John Wiley & Sons, New York, 251 pp.
- BIENIAWSKI Z.T. (1993) - *Classification of rock masses for engineering : the RMR system and future trends*. In: *Comprehensive Rock Engineering*, vol. 3, pp. 553–573. Pergamon Press.
- BRACE W.F. (1964) - *Brittle fracture of rocks*. In: W.R. JUDD (Ed.), *State of Stress in the Earth's Crust*, pp. 111–180. Elsevier, New York.
- CEBALLOS F., OLALLA & JIMÉNEZ R. (2014) - *Relationship between RMRb and GSI based on in situ data*. In: L.R. ALEJANO, A. PERUCHO, C. OLALLA & R. JIMÉNEZ (Eds.), *Rock Engineering and Rock Mechanics: Structures in and on Rock Masses*, pp. 375–380. CRC Press, Taylor & Francis, London.
- COON R. & MERRITT A. (1970) - *Predicting in-situ modulus of deformation using rock quality indexes*. ASTM Special Technical Publication, **477**, 154–173.
- DEERE D.U. (1964) - *Technical description of rock cores for engineering purposes*. Rock Mechanics and Rock Engineering, **1** (1), 17–22.
- DEERE D.U., COON R.F. & MERRITT A.H. (1969) - *Engineering classification of in-situ rock*. Technical report, DTIC Document.
- FECKER E. & RENGERS N. (1971) - *Measurement of large scale roughness of rock planes by means of profilograph and geological compass*. In: *Proceedings of the International Symposium on Rock Mechanics, Nancy, France*, pp. 1–18.
- FRANKLIN J.A. (1971) - *Triaxial strength of rock materials*. Rock Mechanics and Rock Engineering, **3** (2), 86–98.
- FRANKLIN J.A., MAERZ N.H. & BENNETT C.P. (1988) - *Rock mass characterization using photoanalysis*. International Journal of Mining and Geological Engineering, **6**, 97–112.
- GOODMAN R.E. (1989) - *Introduction to Rock Mechanics*. John Wiley & Sons, New York, 582 pp.
- GOODMAN R.E. (1995) - *Block theory and its application*. Géotechnique, **45** (3), 383–423.
- GOODMAN R.E. & BRAY J.W. (1977) - *Toppling of rock slopes*. In: *Proceedings of Specialty Conference on Rock Engineering for Foundations and Slopes*, American Society of Civil Engineering, vol. 2, pp. 201–234. New York.
- GOODMAN R.E. & SHI G.H. (1985) - *Block Theory and its Application to Rock Engineering*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 338 pp.
- GRIFFITH A.A. (1921) - *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical Transaction of the Royal Society London, A, **221**, 163–198.
- GRIFFITH A.A. (1924) - *The theory of rupture*. In: C.B. BIEZENO & J.M. BURGERS (Eds.), *First International Congress on Applied Mechanics*, pp. 55–63. Technische Boekhandel and Drukkerij, Delft.
- HERGET G. & UNRUG K. (1976) - *In situ rock strength from triaxial testing*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **13** (11), 299–302.
- HOBBS B.E., MEANS W.D. & WILLIAMS P.F. (1976) - *An Outline of Structural Geology*. John Wiley & Sons, New York, 571 pp.
- HOEK E. (1994) - *Strength of rock and rock masses*. International Society for Rock Mechanics, News Journal, **2** (2), 4–16.
- HOEK E. & BRAY J.W. (1980) - *Rock Slope Engineering*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOEK E. & BROWN E. (1980) - *Underground Excavations in Rocks*. Institution of Mining and Metallurgy, London.
- HOEK E. & BROWN E.T. (1997) - *Practical estimates of rock mass strength*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, **34** (8), 1165–1186.
- HOEK E., KAISER P.K. & BAWDEN W.F. (1995) - *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. AA Balkema, Rotterdam, 300 pp.
- HOEK E., MARINOS P. & BENISSI M. (1998) - *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **57** (2), 151–160.
- HUBBERT M. & RUBEY W. (1959) - *Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting. I. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting*. Geological Society of America Bulletin, **70**, 115–166.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (1978) - *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **15**, 319–368.

- JAEGER J.C. & COOK N.G.W. (1979) - *Fundamentals of Rock Mechanics*. Chapman & Hall, London.
- JOHNSTON I.W. (1985) - *Strength of intact geomechanical materials*. Journal of Geotechnical Engineering, **111**, 730–749.
- LISLE R.J. & LEYSHON P.R. (2004) - *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. Cambridge School Press, Cambridge, 112 pp.
- LOUIS C. (1974) - *Introduction a l'hydraulique des roches*. Bulletin Bureau de Recherches Géologiques et Minières, **III** (4), 283–356.
- MAERZ N.H., FRANKLIN J.A. & BENNETT C.P. (1990) - *Joint roughness measurement using shadow profilometry*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **27** (5), 329 – 343.
- MARINOS P. & HOEK E. (2000) - *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. In: *Proceedings of the GeoEng2000 at the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*, pp. 1422–1446. Technomic publishers, Lancaster.
- MARINOS P. & HOEK E. (2001) - *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **60**, 82–92.
- MARINOS P., HOEK E. & MARINOS V. (2006) - *Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **65**, 129–142.
- MARINOS V., MARINOS P. & HOEK E. (2005) - *The geological strength index: applications and limitations*. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, **64**, 55–65.
- MEANS W.D. (1976) - *Stress and Strain: Basic Concepts of Continuum Mechanics for Geologists*. Springer Verlag, New York, 339 pp.
- MEANS W.D. (2005) - *Sforzo e deformazione. Principi di Meccanica del Continuo*. Dario Flaccovio Editore, Palermo, 288 pp.
- MERRITT A.H. & BAECHER G.B. (1981) - *Site characterization in rock engineering*. In: *The 22nd U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), June 29 - July 2, 1981*. American Rock Mechanics Association, Cambridge, MA.
- MESRI G. & GIBALA R. (1972) - *Engineering properties of a Pennsylvanian shale*. In: ASCE (Ed.), *Proc. 13th Symp. on Rock Mechanics*, pp. 57–75.
- PALMSTRÖM A. (1982) - *The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of rock jointing*. In: *Proc. 4th Congr. Int. Assn Eng. Geol.*, vol. 5, pp. 221–228. Dehli.
- PATERSON M. (1978) - *Experimental Rock Deformation - The Brittle Field*. Springer Verlag, Berlin.
- PRICE N.J. (1966) - *Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rock*. Pergamon Press Oxford, 176 pp.
- PRIEST S. & HUDSON J. (1976) - *Discontinuity spacings in rock*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, **13** (5), 135–148.
- PRIEST S. & SAMANIEGO A. (1983) - *A model for the analysis of discontinuity characteristics in two dimensions*. In: *Proceedings of the 5th Congress of the International Society for Rock Mechanics, April 10-15, 1983, Melbourne, Australia*, pp. F199–F207. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- PRIEST S.D. (1985) - *Hemispherical Projection Methods in Rock Mechanics*. George Allen & Unwin, London, 124 pp.
- RABCEWICZ L. (1964) - *The new Austrian tunnelling method, Part 1*. Water Power, **16** (11), 453–456.
- RABCEWICZ L. (1965) - *The new Austrian tunnelling method, Part 2*. Water Power, **16** (12), 19–24.
- RAGAN D. (2009) - *Structural Geology: An Introduction to Geometric Techniques*. Cambridge University Press, New York, 393 pp.
- RAMSAY J.G. (1967) - *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 pp.
- ROMANA M. (1985) - *New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes*. In: *International Symposium on the Role of Rock Mechanics*, pp. 49–53. Zacatecas, Mexico.
- ROMANA M.R. (1993) - *A geomechanical classification for slopes: Slope Mass Rating*. In: J.A. HUDSON, E.T. BROWN, C. FAIRHURST & E. HOEK (Eds.), *Comprehensive Rock Engineering: Principles, Practice and Projects*, vol. 3, pp. 4–44. Pergamon Press.
- ROWLAND S.M., DUEBENDORFER E.M. & SCHIEFELBEIN I.M. (2007) - *Structural Analysis and Synthesis. A Laboratory Course in Structural Geology*. Blackwell Publishing, 322 pp.
- SHI G.H. (1977) - *Stereographic Projection of the Stability Analysis of Rock Mass*. Scientia Sinica, **20** (3), 260–271.
- SHI G.H. (1981) - *The Geometric Method for Rock Stability Analysis*. Scientia Sinica, **3**, 487–495.
- SHI G.H. (1982) - *A geometric method for stability analysis of discontinuous rocks*. Scientia Sinica, **25** (1), 125–143.
- SIBSON R.H. (2004) - *Controls on maximum fluid overpressure defining conditions for mesozonal mineralisation*. Journal of Structural Geology, **26**, 1127–1136.
- SINGH B. & GOEL R.K. (1999) - *Rock Mass Classification: A Practical Approach in Civil Engineering*. Elsevier, Amsterdam, 267 pp.
- SUPPE J. (1985) - *Principles of Structural Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 537 pp.
- TANIMOTO C. & IKEDA K. (1983) - *Acoustic and mechanical properties of jointed rock*. In: *Proceedings of the 5th Congress of the International Society for Rock Mechanics, April 10-15, 1983, Melbourne, Australia*. A. A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- TWISS R. & MOORES E. (1992) - *Structural Geology*. Freeman and Company, New York, 532 pp.
- WICKHAM G.E., TIEDEMANN H.R. & SKINNER E.H. (1972) - *Support determinations based on geological predictions*. In: K.S. LANE & L.A. GARFIELD (Eds.), *Proceedings of the North American Rapid Excavation & Tunnelling Conference*, vol. 1, pp. 43–64. American Society of Mechanical Engineers, New York.
- YOUNG R., HILL J., BRYAN I. & MIDDLETON R. (1985) - *Seismic spectroscopy in fracture characterization*. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, **18** (4), 459–479.