



UNIVERSITÀ
DI SIENA
1240

Università degli Studi di Siena
Centro di GeoTecnologie

Proiezioni Stereografiche: Applicazioni ed Esercizi

Paolo Conti

conti@unisi.it

Aprile 2017

Centro di GeoTecnologie
Università degli Studi di Siena
Via Vetri Vecchi 34
52027 - San Giovanni Valdarno (AR)

www.geotecnologie.unisi.it/conti

versione: 30 aprile 2017

Queste dispense sono destinate agli studenti dell'Università degli Studi di Siena.
ESSE HANNO SOLO UNO SCOPO DIDATTICO, VENGONO DISTRIBUITE GRATUITAMENTE E NON POSSONO ASSOLUTAMENTE ESSERE MESSE IN VENDITA SOTTO QUALSIASI FORMA.

Indice

1	Esercizi	1
2	Ricostruzione geometria di pieghe	3
2.1	Pieghe cilindriche	3
2.2	Angolo di apertura e piano assiale	4
2.3	Geometria del piegamento	7
2.4	Orientazione di pieghe	8
3	Giacitura da sondaggi inclinati	15
4	Restaurazione di strati inclinati, discordanze e paleocorrenti	19
4.1	Restaurazione di strati inclinati e discordanze	19
4.2	Restaurazione di paleocorrenti	21
4.2.1	Strati inclinati con asse orizzontale	21
4.2.2	Strati inclinati con asse inclinato	21
5	Analisi cinematica di faglie	23
5.1	Faglie e meccanismi focali	23
5.2	Analisi cinematica di faglie	23
5.2.1	Metodo degli assi P e T	26
5.2.2	Metodo dei diedri P e T	26
6	Applicazione a problemi di geologia applicata	29
7	Soluzione degli esercizi	33

1

Esercizi

In questo capitolo sono riportati esercizi base sull'uso delle proiezioni stereografiche (linee, piani, intersezioni, ecc.). Tutte le misure sono riportate, eccetto dove espressamente indicato, come "direzione di immersione"/"inclinazione", es. 234/68).

Esercizio 1

- Riportare in proiezione stereografica come tracce ciclografiche le seguenti misure di strato: 30/20 e 120/60.
 - Riportare in proiezione stereografica come poli le seguenti misure di strato: 45/80 e 310/46.
 - Riportare in proiezione stereografica i seguenti assi di piega: 88/14 e 265/36.
- Soluzioni in Fig. 7.1 a pagina 34.

Esercizio 2

Riportare in proiezione stereografica come tracce ciclografiche le seguenti misure di strato: 1: 34/55; 2: 50/32; 3: 350/30; 4: 5/12; 5: 110/40; 6: 95/72; 7: 140/60; 8: 274/50; 9: 230/55; 10: 250/24; 11: 185/80; 12: 176/60. Soluzione in Fig. 7.2 a pagina 34

Esercizio 3

Riportare in proiezione stereografica come poli le seguenti misure di strato: 1: 214/20; 2: 134/50; 3: 30/60; 4: 240/80; 5: 302/72; 6: 10/74; 7: 355/14; 8: 180/45; 9: 92/44; 10: 200/38; 11: 265/65; 12: 304/50; 13: 355/66; 14: 160/82. Soluzione in Fig. 7.3 a pagina 35.

Esercizio 4

Riportare in proiezione stereografica le seguenti linee: 1: 120/56; 2: 333/23; 3: 300/76; 4: 255/43; 5: 87/12; 6: 64/41; 7: 12/28; 8: 201/30; 9: 176/60; 10: 160/8; 11: 140/49; 12: 90/70; 13: 45/56; 14: 288/45; 15: 340/61. Soluzione in Fig. 7.4 a pagina 35.

Esercizio 5

Utilizzando le proiezioni stereografiche e riportando i piani come tracce ciclografiche:

- determinare l'intersezione tra i piani: 280/50 e 90/36;
- determinare l'orientazione del piano bisettore l'angolo acuto tra i piani 250/60 e 32/40.

Soluzione in Fig. 7.5 a pagina 36.

Esercizio 6

Utilizzando le proiezioni stereografiche risolvere i seguenti problemi.

- Determinare l'angolo acuto tra le linee 14/38 e 80/52 (Soluzione: 47°).
- Determinare l'angolo acuto tra le linee 302/50 e 200/38 (Soluzione: 69°).
- Determinare l'angolo ottuso tra le linee 196/30 e 290/38 (Soluzione: 105°).
- Determinare l'angolo ottuso tra le linee 302/50 e 200/38 (Soluzione: 111°).

- e) Determinare l'angolo acuto tra i piani 170/46 e 120/32 (Soluzione: 33°)
- f) Determinare l'angolo acuto tra i piani 45/30 e 320/36 (Soluzione: 43°)
- g) Determinare l'angolo acuto tra il piano 250/46 e la linea 290/20 (Soluzione: 16°).
- h) Determinare l'angolo acuto tra il piano 175/50 e la linea 150/12 (Soluzione: 33°).
- i) Determinare la linea intersezione tra il piano 28/44 e il piano 290/60 (Soluzione: 353/38).
- j) Determinare la linea intersezione tra il piano 205/40 e il piano 62/50 (Soluzione: 137/17).
- k) Determinare la linea intersezione tra il piano 258/32 e il piano 282/40 (Soluzione: 235/30).
- l) Determinare il piano bisettore dell'angolo acuto tra il piano 85/50 e il piano 150/12 (Soluzione: 97/28).
- m) Determinare il piano bisettore dell'angolo acuto tra il piano 192/60 e il piano 230/20 (Soluzione: 203/39).
- n) Determinare il piano bisettore dell'angolo acuto tra il piano 318/40 e il piano 280/58 (Soluzione: 296/47).

Esercizio 7

Utilizzando le proiezioni stereografiche risolvere i seguenti problemi.

- a) Determinare il piano contenente le linee 280/54 e 353/28. (Soluzione: 286/54)
- b) Determinare il piano contenente le linee 165/31 e 262/46. (Soluzione: 227/52)
- c) Determinare il piano contenente le linee 110/61 e 178/46. (Soluzione: 122/62)
- d) Determinare l'inclinazione apparente di un piano di orientazione 102/60 su di un piano verticale di direzione ("strike") N 150° E (Soluzione: 49° Sud).
- e) Determinare l'inclinazione apparente di un piano di orientazione 40/28 su di un piano verticale di direzione ("strike") N 146° E (Soluzione: 8° NW).
- f) Determinare l'inclinazione apparente di un piano di orientazione 165/42 su di un piano verticale di direzione ("strike") N 56° E (Soluzione: 16° SW).

Esercizio 8

Utilizzando le proiezioni stereografiche risolvere i seguenti problemi.

- a) Determinare l'orientazione della linea che giace sul piano 30/50 e che ha un pitch di 40° verso Sud-Est su tale piano. (Soluzione: 92/29)
- b) Determinare l'orientazione della linea che giace sul piano 205/36 e che ha un pitch di 28° verso Sud-Est su tale piano. (Soluzione: 138/16)
- c) Determinare l'orientazione della linea che giace sul piano 28/50 e che ha un pitch di 41° verso Nord-Ovest su tale piano. (Soluzione: 327/30)
- d) Determinare l'orientazione di una linea che giace sul piano 255/40 e ha una direzione di immersione N 200° . (soluzione: 200/26)
- e) Determinare l'orientazione di una linea che giace sul piano 107/28 e ha una direzione di immersione N 62° . (soluzione: 62/21)
- f) Determinare l'orientazione di una linea che giace sul piano 273/54 e ha una direzione di immersione N 305° . (soluzione: 305/49)
- g) Determinare l'orientazione di una linea che giace sul piano 32/60 e ha un'inclinazione di 30° verso Sud-Est. (soluzione: 103/80)
- h) Determinare l'orientazione di una linea che giace sul piano 296/38 e ha un'inclinazione di 26° verso Nord-Est. (soluzione: 347/26)
- i) Determinare l'orientazione di una linea che giace sul piano 255/45 e ha un'inclinazione di 38° verso Sud-Ovest. (soluzione: 216/38)
- j) Dato il piano di orientazione 255/56 e la linea di orientazione 300/46, determinare il pitch della linea sul piano. (Soluzione: 61° Nord-Ovest).
- k) Dato il piano di orientazione 336/50 e la linea di orientazione 37/30, determinare il pitch della linea sul piano. (Soluzione: 41° Nord-est).
- l) Dato il piano di orientazione 205/36 e la linea di orientazione 160/27, determinare il pitch della linea sul piano. (Soluzione: 51° Sud-Est).

2

Ricostruzione geometria di pieghe

Sul terreno spesso non è possibile misurare direttamente con la bussola l'orientazione degli elementi geometrici che costituiscono una piega, cioè l'asse della piega, il piano assiale, ecc.. Questo perché le condizioni di affioramento possono essere non ottimali (coperture quaternarie, alterazione, coperture vegetali, ecc.) e non permettere l'osservazione dei suddetti elementi, oppure perché le pieghe possono essere di grandi dimensioni, per esempio strutture chilometriche, e non possono permettere il riconoscimento contemporaneo nell'area di rilevamento della zona di cerniera, del piano assiale, o degli altri elementi strutturali.

Tutti questi elementi sono però di fondamentale importanza per la realizzazione di sezioni geologiche in aree con strutture a pieghe. In molti casi la raccolta di misure in campagna della superficie che viene piegata e la loro successiva elaborazione mediante proiezioni stereografiche permette di ricavare molte informazioni sulla struttura, specialmente nel caso di pieghe cilindriche, informazioni altrimenti non ottenibili durante le fasi di rilevamento sul terreno.

2.1 Pieghe cilindriche

Se si riportano in proiezione stereografica le misure raccolte in un'area interessata da piegamento (Fig. 2.1) è possibile stabilire se siamo in presenza di pieghe cilindriche, coniche oppure di pieghe con geometria più complessa.

Nel caso di pieghe cilindriche, cioè di superfici piegate ottenute traslando una linea parallela a se stessa e quindi con assi rettilinei, è importante ricordare che due piani qualsiasi tangenti la superficie piegata si intersecano secondo una linea che è parallela all'asse della piega (Fig. 2.1a). Da questo deriva che se raccogliamo in campagna una serie di misure in vari punti di una piega cilindrica (fianchi, cerniera) e se riportiamo queste misure in proiezione stereografica come tracce ciclografiche, queste si intersecheranno tutte in un punto, l'asse della piega (Fig. 2.2b). L'asse della piega ricavato in questo modo è detto asse β .

Un'altra proprietà delle pieghe cilindriche è che se si considerano varie superfici tangenti alla piega, le direzioni normali a queste superfici giacciono tutte sul solito piano, il piano π (Fig. 2.2c). Se si riportano quindi in proiezione stereografica le misure raccolte in vari punti di una piega non come tracce ciclografiche ma come poli dei piani, i poli andranno a trovarsi su di un grande cerchio (Fig. 2.2d). Il grande cerchio così ricavato è detto cerchio π . L'asse della piega sarà la direzione ortogonale al piano π , cioè il polo del cerchio π , l'asse della piega ricavato in questo modo è detto asse π . Nella realtà non si avrà quasi mai una disposizione esatta delle tracce ciclografiche o dei poli delle misure su grandi o piccoli cerchi come riportato in Fig. 2.2, questo perché in natura raramente le pieghe sono perfettamente cilindriche e perché errori dell'ordine di qualche grado possono essere commessi con la bussola in campagna nel misurare le superfici piegate.

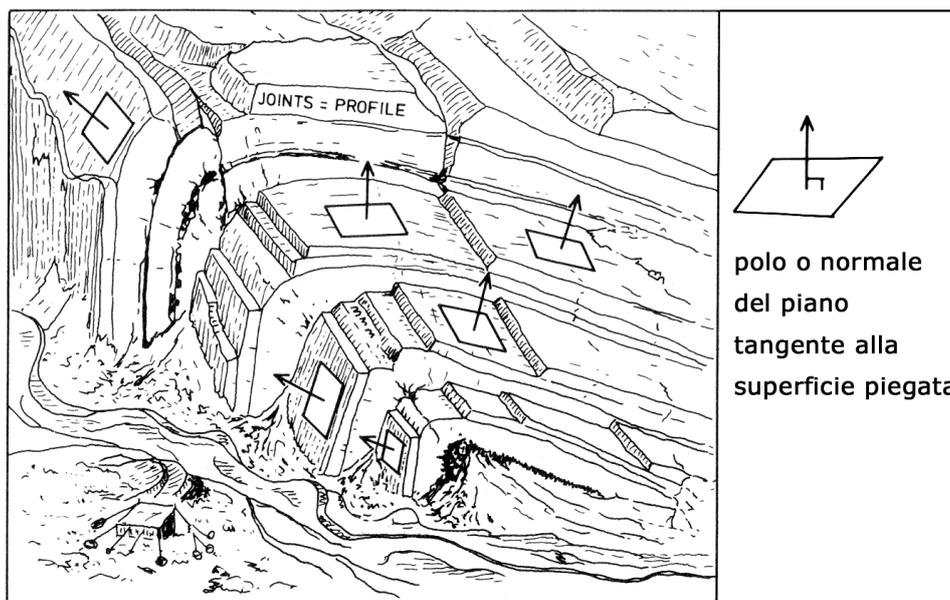


Figura 2.1 Area in cui la stratificazione risulta piegata. Sono indicati i piani tangenti alla stratificazione che rappresentano le misure raccolte in campagna. Queste misure sono successivamente riportate in proiezione stereografica.

Esercizio 9

Determinare asse β e cerchio π per la seguente piega in cui sono state misurate le seguenti misure di strato: 263/57; 232/46; 178/47; 147/61; 203/41; 252/50. Utilizzare le tracce ciclografiche. [$\beta = 208/42$; $\pi = 28/48$]

Esercizio 10

Determinare asse β e cerchio π per la seguente piega in cui sono state misurate le seguenti misure di strato: 141/53; 075/24; 125/36; 014/37; 037/26; 352/65; 026/31; 090/24; 102/25. Utilizzare i poli dei piani. [$\beta = 70/23$; $\pi = 250/67$]

2.2 Angolo di apertura e piano assiale

L'angolo di apertura di una piega è l'angolo tra i due fianchi se i due fianchi sono dei piani, oppure l'angolo che fanno tra loro le due superfici tangenti ai fianchi in corrispondenza delle linee di flesso (Fig. 2.3a). L'angolo di apertura di una piega deve essere misurato sul piano ortogonale all'asse della piega.

Il caso più semplice è quello di una singola superficie piegata, con fianchi rettilinei, cioè dei piani in tre dimensioni (Fig. 2.3). In proiezione stereografica l'angolo di apertura è determinato proiettando come poli le misure raccolte nei due fianchi della piega e misurando l'angolo tra loro. In proiezione stereografica è possibile leggere due angoli, l'angolo α di Fig. 2.3b e il suo complementare angolo β ; quale dei due angoli scegliere come angolo di apertura della piega (e quindi la giacitura del piano assiale) richiede (Fig. 2.3d):

- di avere un'idea, anche approssimativa, dell'angolo di apertura della piega da osservazioni di campagna (es. sapere se è maggiore o minore di 90° , cioè sapere se è una piega aperta o chiusa), oppure;
- conoscere da dati di campagna la giacitura, anche approssimativa, del piano assiale (es. sapere se è circa orizzontale o circa verticale, per esempio dall'analisi delle pieghe minori). Il piano assiale per una singola superficie piegata è il piano bisettore dell'angolo di apertura, il piano assiale quindi può essere ricavato esattamente in proiezione stereografica.

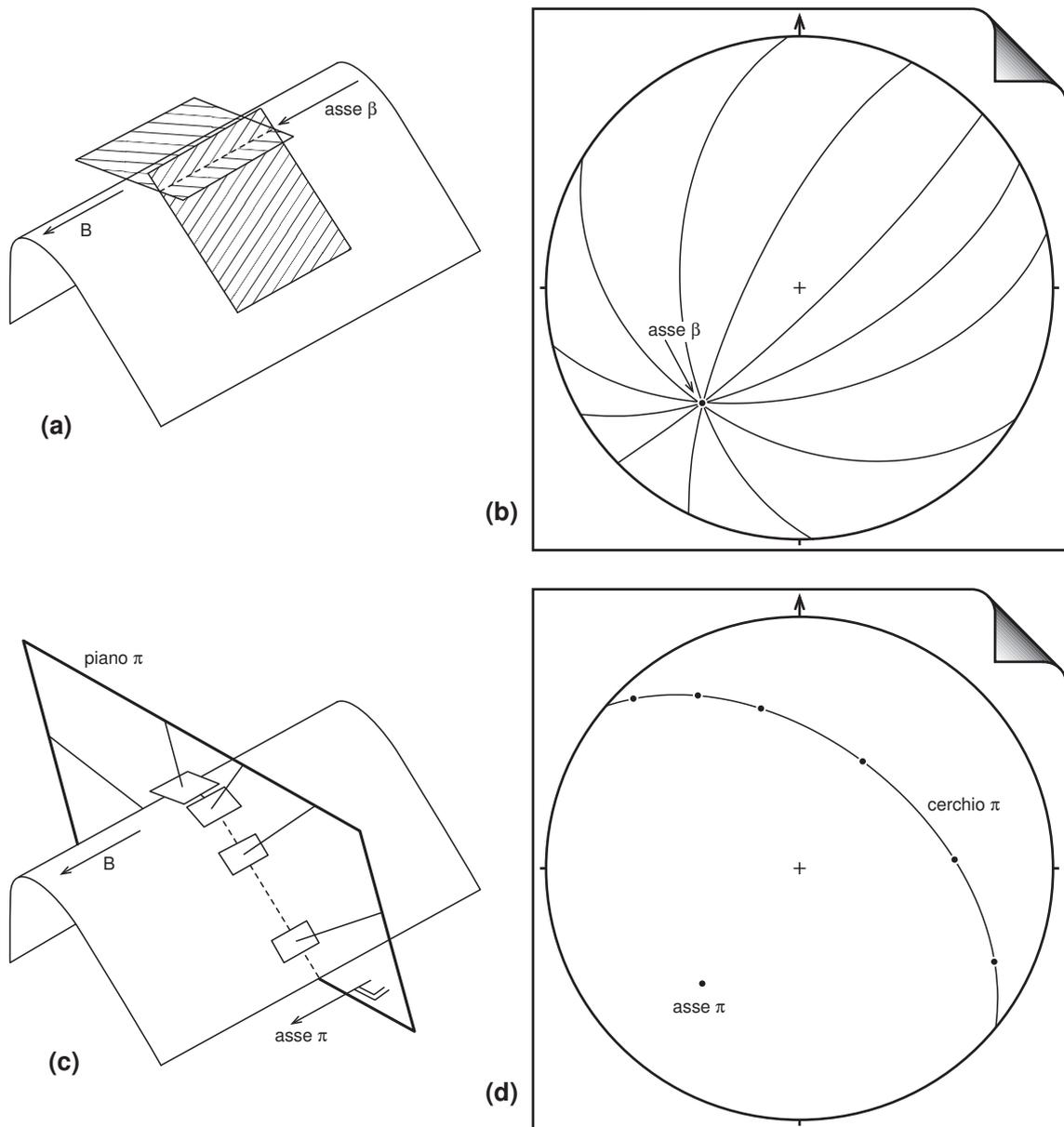


Figura 2.2 (a) Piega cilindrica, sono rappresentati due piani tangenti alla superficie piegata. B è l'asse della piega. (b) Costruzione dell'asse β di una piega. (c) Piega cilindrica, con riportate le direzioni ortogonali alla superficie piegata. (d) Costruzione del cerchio π per una piega. Si noti che B, β e π rappresentano il solito elemento geometrico (l'asse della piega), varia solo il modo di determinarlo.

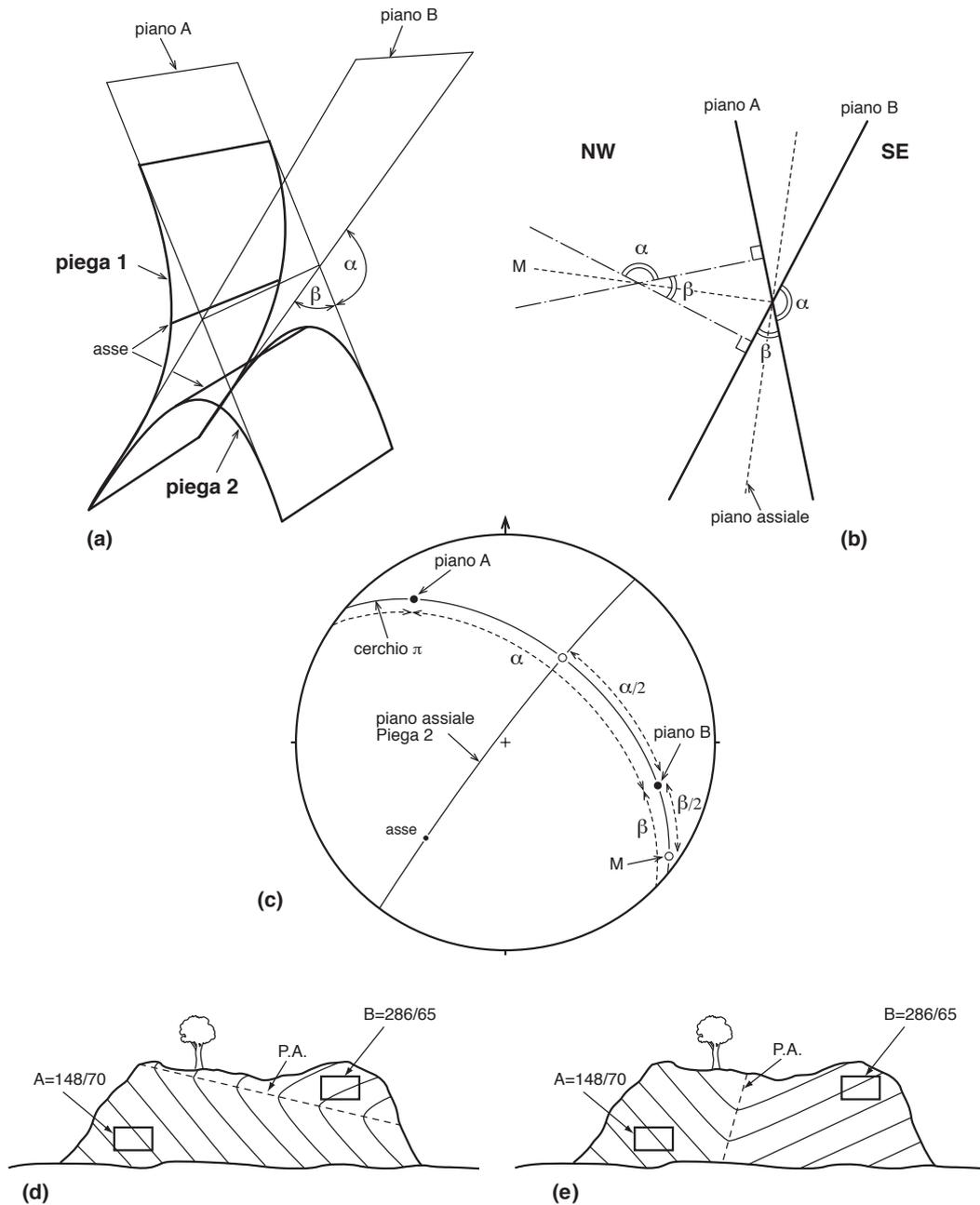


Figura 2.3 (a) Angolo di apertura di due pieghe. α è l'angolo di apertura della piega 1, β è l'angolo di apertura della piega 2. (b) Sezione verticale attraverso i due piani. (c) Angoli di apertura in proiezione stereografica. Il piano A=148/70, B=286/65. (d), (e) Due affioramenti con le solite misure. Si noti come con le solite misure siano possibili due pieghe con giacitura nettamente diversa, in proiezione stereografica le due pieghe non sono tra loro distinguibili, è necessaria l'osservazione in campagna per sapere in quale dei due casi siamo (piega con piano assiale orizzontale o piega con piano assiale verticale).

Tabella 2.1 Classificazione delle pieghe in base all'angolo di apertura.

piega	angolo di apertura, α
Blanda	180°-120°
Aperta	120°-70°
Chiusa	70°-30°
Serrata	30°-0°
Isoclinale	0°

Supponiamo di volere determinare esattamente la giacitura (immersione/inclinazione) del piano assiale della piega 2 di Fig. 2.3a di cui conosciamo solo approssimativamente l'orientazione, circa verticale. Si procede nel seguente modo:

- si proiettano in uno stereogramma (Fig. 2.3c) i poli dei due fianchi (piani A e B) e si determina il cerchio π e l'asse della piega;
- si determina l'angolo di apertura della piega (angolo β in Fig. 2.3b e in Fig. 2.3c);
- all'interno dell'angolo di apertura β si ricava il punto mediano (punto M in Fig. 2.3c);
- il piano assiale della piega è la traccia ciclografica il cui polo è il punto M.

E' importante ricordare che in proiezione stereografica la traccia ciclografica del piano assiale dovrà passare per l'asse della piega. In modo analogo si dovrà operare per ricavare il piano assiale della piega 1.

Esercizio 11

In un affioramento con una piega con piano assiale circa verticale i due fianchi hanno giacitura media 148/52 e 280/34. Determinare asse delle piega, giacitura del piano assiale e angolo di apertura α . [A= 222/20, P.A.= 308/80, $\alpha = 102^\circ$]

Esercizio 12

In un affioramento con una piega con piano assiale circa orizzontale i due fianchi hanno giacitura media 160/24 e 123/52. Determinare asse delle piega, giacitura del piano assiale e angolo di apertura α . [A= 197/20, P.A.= 135/37, $\alpha = 35^\circ$]

Esercizio 13

In un affioramento con una piega con piano assiale circa verticale i due fianchi hanno giacitura media 158/24 e 120/40. Determinare asse delle piega, giacitura del piano assiale e angolo di apertura α . [A= 180/22, P.A.= 272/70, $\alpha = 155^\circ$]

2.3 Geometria del piegamento

Se si raccolgono varie misure in un'area interessata da piegamento e se riportiamo queste misure in proiezione stereografica, la loro distribuzione ci permette di fare importanti considerazioni sulla geometria della piega, considerazioni che spesso sono difficili (se non impossibili) da effettuare in campagna specialmente se abbiamo a che fare con strutture piegate di dimensioni chilometriche.

Come abbiamo visto nei capitoli precedenti la distribuzione dei poli di una superficie piegata dipende dal tipo di piega (cilindrica, conica), dall'orientazione dell'asse della piega e dalla giacitura del piano assiale. Oltre a questi fattori bisogna considerare però anche l'angolo di apertura delle pieghe e il grado di arrotondamento della cerniera. La Tab. 2.1 riporta i termini comunemente usati per una classificazione delle pieghe basata sull'angolo di apertura.

Vedremo ora alcuni esempi basandoci, per semplicità, sull'analisi di pieghe cilindriche. La Fig. 2.4 riporta varie pieghe con differente angolo di apertura e grado di arrotondamento e le rispettive proiezioni stereografiche. Per semplicità tutte le pieghe rappresentate hanno piano assiale verticale, asse inclinato verso sud e i due fianchi di uguale lunghezza. In proiezione stereografica i due fianchi sono quindi ugualmente rappresentati (solito numero di misure

e quindi solito numero di punti in proiezione stereografica). Dalla Fig. 2.4 si vede come l'aumentare dell'angolo di apertura della piega provochi un "avvicinamento" delle misure in proiezione stereografica. Lungo la traccia ciclografica che passa per le misure, l'angolo α tra i due massimi delle misure ci fornisce un'indicazione dell'apertura della piega. Per quanto riguarda il grado di arrotondamento della cerniera, dalla Fig. 2.4 si vede come nel caso di pieghe "a cuspidi" (cerniere non arrotondate, Fig. 2.4a, d, e) si hanno due massimi ben distinti in proiezione stereografica, perché i fianchi sono rettilinei e nella zona di cerniera non ci sono giaciture della stratificazione ortogonali alla giacitura del piano assiale.

Nel caso di pieghe con cerniera arrotondata (Fig. 2.4c, f, i) si ha una variazione continua della giacitura della stratificazione, questo si traduce in proiezione stereografica in una maggiore dispersione dei punti sul cerchio π . Lungo questo grande cerchio la parte non occupata da punti è la misura dell'angolo di apertura della piega (α in Fig. 2.4f).

Se abbiamo a che fare con pieghe asimmetriche i fianchi avranno lunghezza differente, sul fianco più corto sarà più difficile raccogliere misure e quindi ci saranno meno punti in proiezione stereografica che rappresenteranno questo fianco.

Esercizio 14

In una piega con piano assiale circa verticale sono state raccolte le seguenti misure: 214/68, 214/68, 214/68, 217/69, 216/67, 212/69, 212/65, 215/70, 206/66, 201/63, 199/65, 190/60, 190/63, 178/63, 174/58, 166/63, 160/60, 155/63, 153/59, 212/67, 213/70, 140/63, 138/66, 135/65, 137/62, 137/64, 140/65, 145/62, 138/64, 135/67, 134/63, 139/60, 142/62, 214/66, 215/70. Determinare asse delle piega, angolo di apertura α , geometria della piega e della cerniera. [A= 168/60, $\alpha = 112^\circ$, piega aperta, cerniera arrotondata]

Esercizio 15

In una piega con piano assiale verticale sono state raccolte le seguenti misure: 297/75, 294/74, 296/72, 213/75, 215/74, 211/72, 212/79, 214/72, 210/76, 293/73, 295/77, 291/75, 297/73, 215/77, 211/75, 213/73, 293/76, 296/73, 294/72, 214/73, 211/77, 214/78, 299/74, 298/77, 212/74, 214/77. Determinare asse delle piega, angolo di apertura α , geometria della piega e della cerniera. [A= 254/70, $\alpha = 100^\circ$, piega aperta, cerniera a cuspidi]

2.4 Orientazione di pieghe

Oltre a quelli già visti nel Capitolo 2.3, altri due importanti parametri che determinano la distribuzione delle misure in proiezione stereografica sono l'inclinazione dell'asse e l'inclinazione del piano assiale. Sulla base dell'inclinazione dell'asse si possono distinguere pieghe con asse orizzontale, pieghe con asse inclinato e pieghe con asse verticale. In base all'inclinazione del piano assiale si possono distinguere pieghe con piano assiale verticale, pieghe con piano assiale inclinato e pieghe con piano assiale orizzontale.

La Fig. 2.5 mostra le possibili orientazioni di pieghe. La Fig. 2.6 mostra invece le proiezioni stereografiche per pieghe con asse o piano assiale variamente inclinato.

È importante notare che per comodità nel caso di questo tipo di analisi solitamente si proiettano in proiezione stereografica i piani della superficie piegata come poli dei piani. Occorre ricordare che i piani che immergono per esempio verso Ovest hanno un polo che si dispone nella parte orientale (quindi verso Est) della proiezione stereografica, cioè i poli dei piani sono "invertiti" rispetto all'orientazione reale dei fianchi della piega in natura (Fig. 2.7a). Allo stesso tempo è importante ricordare che fianchi di una piega chiusa o serrata hanno dei massimi in proiezione stereografica molto ravvicinati (Fig. 2.7b) e che si sovrappongono nel caso di pieghe isoclinali.

Combinando le possibili orientazioni dell'asse di una piega (Fig. 2.6a, b, c) con le possibili orientazioni del piano assiale (Fig. 2.6d, e, f) si ottengono le proiezioni stereografiche per:

- a) pieghe con asse orizzontale e piano assiale verticale (Fig. 2.8a);
- b) pieghe con asse inclinato e piano assiale verticale (Fig. 2.8b);

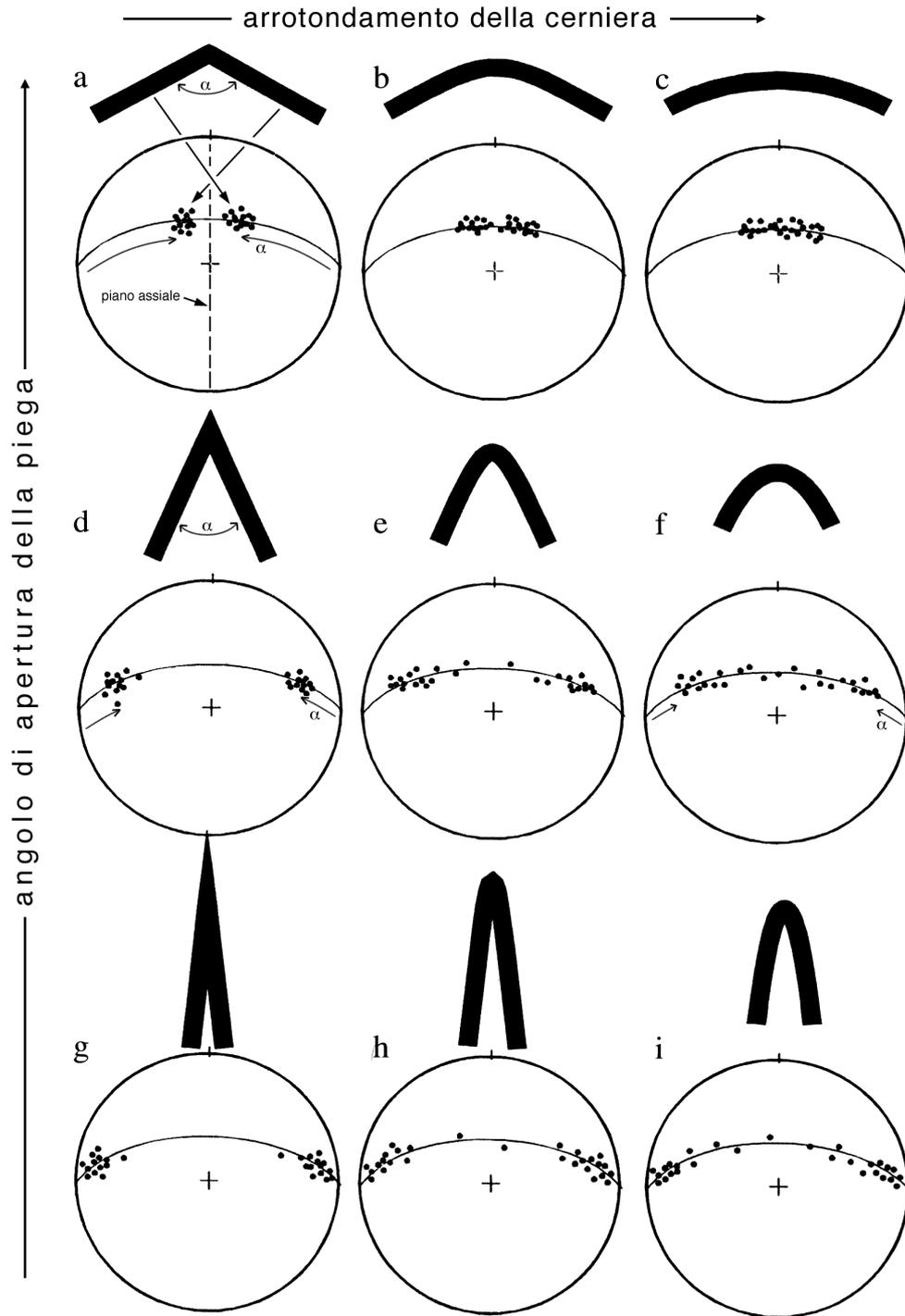


Figura 2.4 Vari tipi di pieghe con angolo di apertura e grado di arrotondamento della cerniera differente, e relative proiezioni stereografiche. α è l'angolo di apertura della piega.

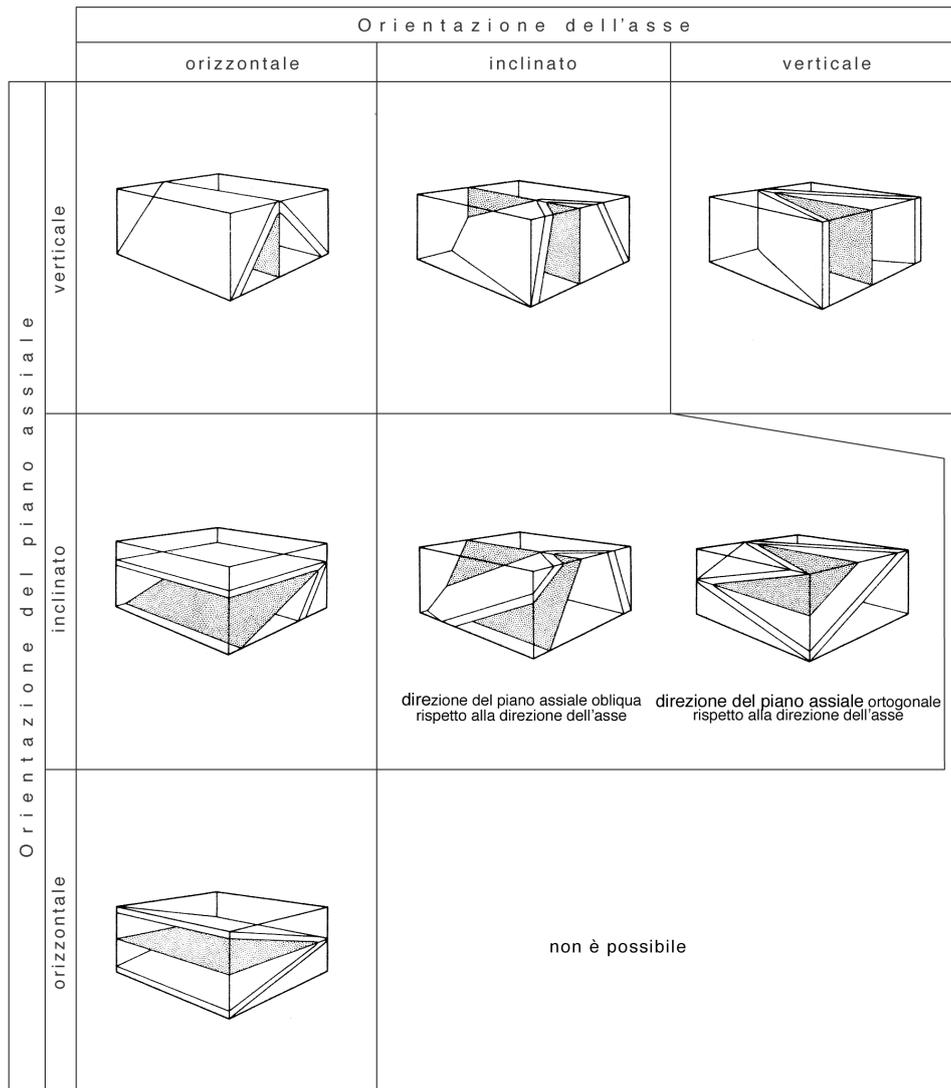


Figura 2.5 Possibili orientazioni di pieghe al variare della giacitura dell'asse e del piano assiale.

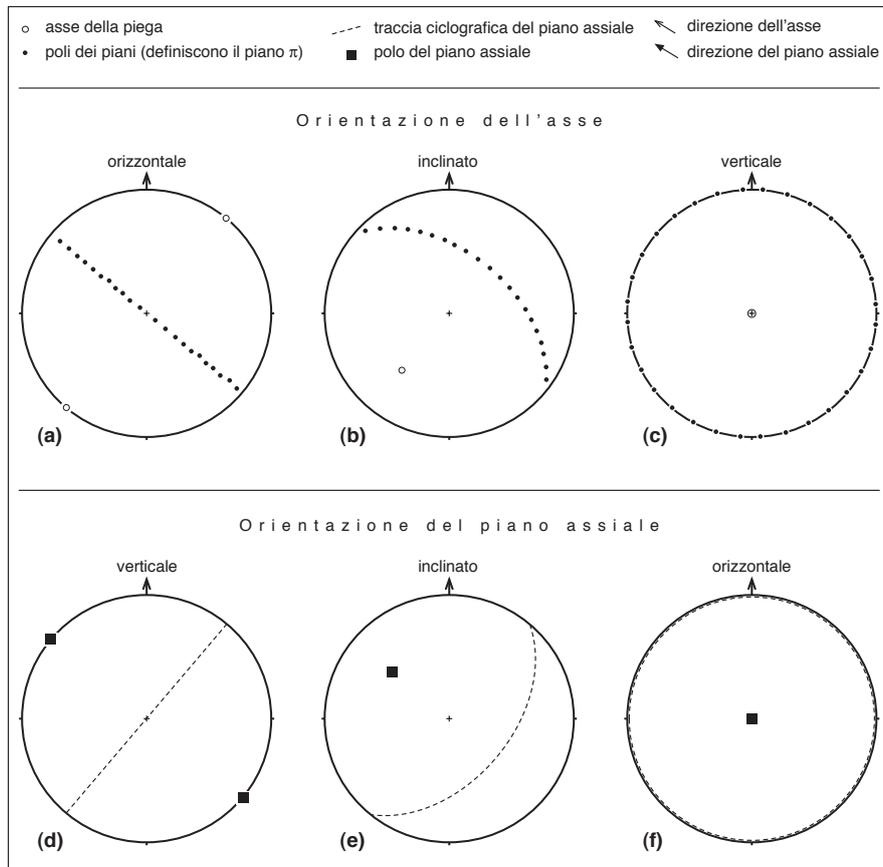


Figura 2.6 Proiezioni stereografiche per pieghe con asse (a, b, c) e piano assiale (d, e, f) variamente inclinato.

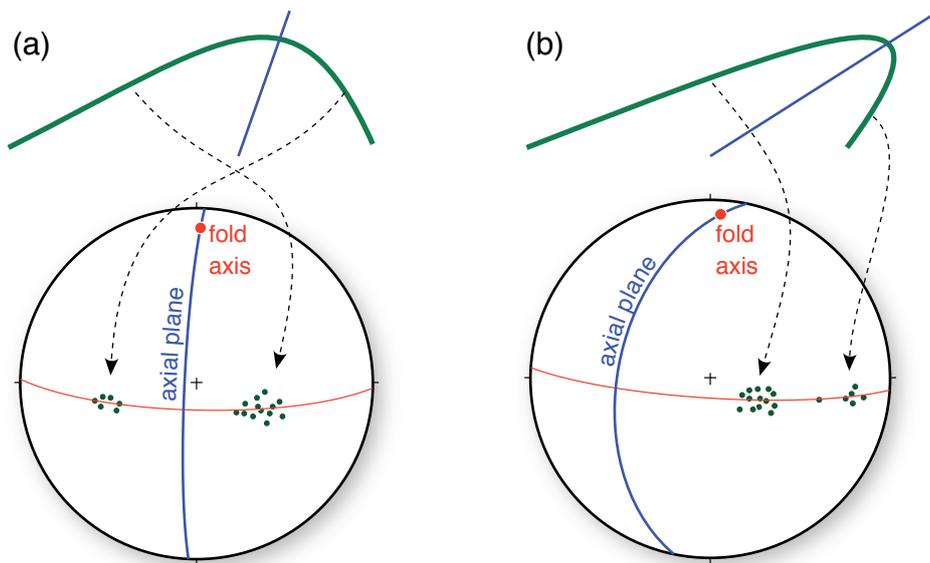


Figura 2.7 Determinazione dell'orientazione piano assiale di una piega in proiezione stereografica. (a) Piega inclinata (piano assiale inclinato), (b) piega rovesciata (piano assiale inclinato, un fianco rovesciato). Si noti la posizione dei massimi delle misure raccolte nei due fianchi, in quanto si riportano le misure come poli dei piani.

- c) pieghe con asse verticale e piano assiale verticale (Fig. 2.8c);
- d) pieghe con asse orizzontale e piano assiale inclinato (Fig. 2.8d);
- e) pieghe con asse inclinato e piano assiale inclinato, in cui è possibile distinguere:
 - i. il caso generale, con direzione del piano assiale obliqua rispetto alla direzione dell'asse (Fig. 2.8e);
 - ii. il caso particolare in cui la direzione del piano assiale è ortogonale rispetto alla direzione dell'asse (Fig. 2.8f);
- f) pieghe con asse orizzontale e piano assiale inclinato (Fig. 2.8g).

Dalla Fig. 2.8 si vede che non tutte le combinazioni sono possibili in natura, come ad esempio pieghe con asse verticale e piano assiale inclinato, asse inclinato e piano assiale orizzontale e asse verticale e piano assiale orizzontale. È importante ricordare che:

- a) la direzione del piano assiale coincide con la direzione dell'asse solo in alcuni casi particolari, mentre generalmente sono diverse;
- b) il cerchio π su cui si disperdono i poli della superficie piegata contiene sempre il polo del piano assiale.

Vediamo ora con esempio di chiarire i rapporti tra misure, asse, piano assiale e traccia del piano assiale in una carta geologica e in proiezione stereografica. In Fig. 2.9a è rappresentata una piega generica con piano assiale inclinato e asse inclinato, la direzione del piano assiale è obliqua rispetto alla direzione di immersione dell'asse. A, B, C e D sono quattro misure di stratificazione raccolte nei fianchi (A, B, D) e nella zona di cerniera (C) della piega.

Dalla Fig. 2.9b e dalla Fig. 2.9c si possono trarre le seguenti conclusioni, valide per qualsiasi piega generica:

- a) la direzione del piano assiale della piega è differente dalla direzione di immersione dell'asse della piega;
- b) nella carta geologica la traccia del piano assiale (P.A. in Fig. 2.9b) avrà un andamento differente rispetto alla direzione di immersione dell'asse;
- c) se la piega ha un fianco verticale, la direzione (*strike*) della misura verticale (misura A) è anche la direzione di immersione dell'asse della piega;
- d) se la piega ha un fianco verticale, la misura la cui direzione è ortogonale alla misura verticale (misura C) è, tra tutte le possibili misure, quella con inclinazione minore, e tale valore di inclinazione è uguale al valore di inclinazione dell'asse della piega.

Esercizio 16

In corrispondenza dei due fianchi di una piega serrata sono state raccolte le seguenti misure di strato: 201/8,194/12,214/10,194/12,199/8,200/35,197/35,198/33,201/34,203/33. Determinare l'asse della piega, la giacitura del piano assiale, l'angolo di apertura della piega α . [A=110/0, P.A.=200/21, $\alpha = 24^\circ$, vedi soluzione net in Fig. 7.7].

Esercizio 17

In corrispondenza dei due fianchi di una piega serrata sono state raccolte le seguenti misure di strato: 243/54, 248/46, 244/49, 244/52, 247/48, 321/20, 312/19, 327/20, 318/21, 338/21. Determinare l'asse della piega, la giacitura del piano assiale, l'angolo di apertura della piega α . [A=316/20, P.A.=268/30, $\alpha = 48^\circ$, vedi soluzione net in Fig. 7.8].

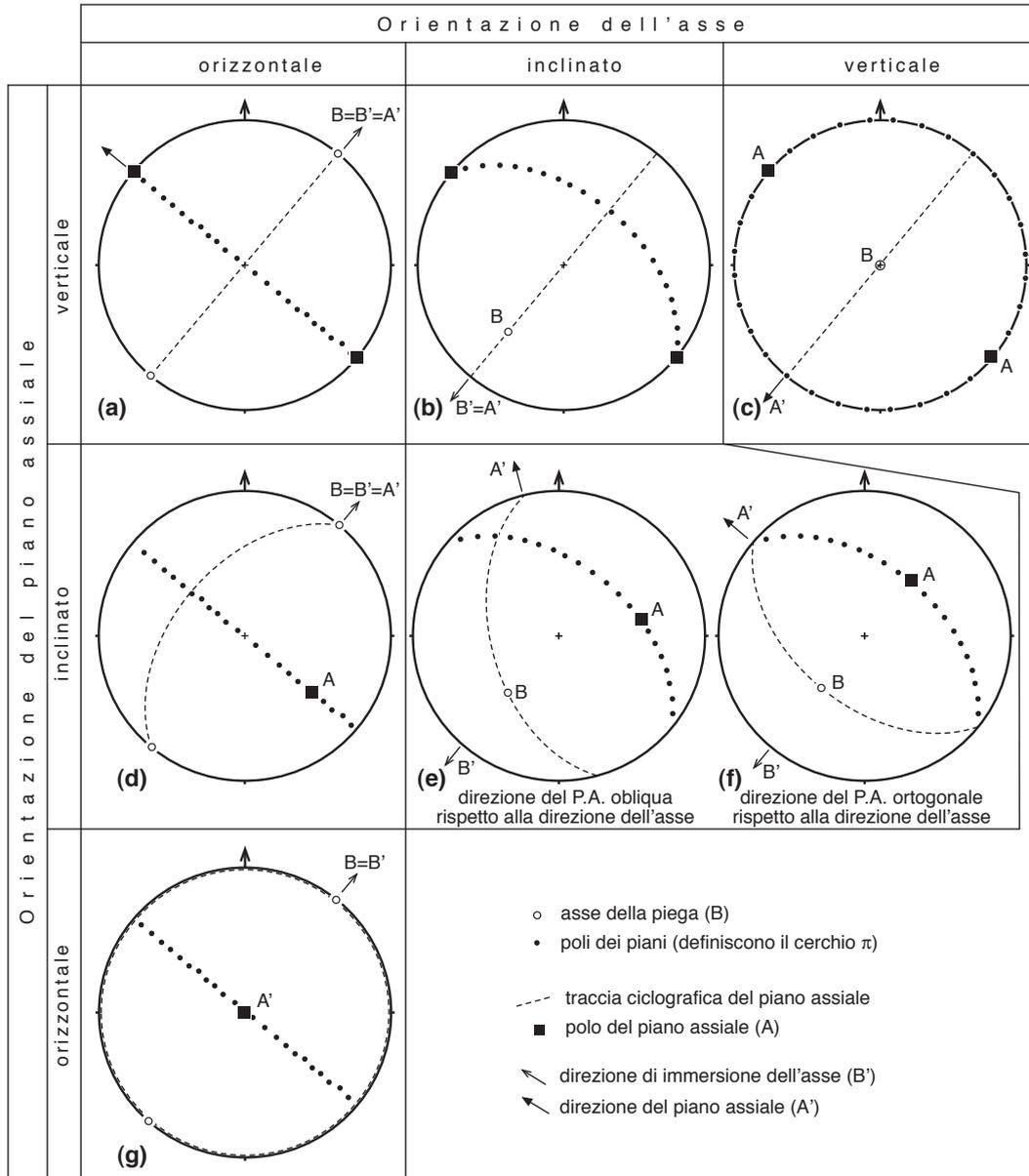


Figura 2.8 Possibili proiezioni stereografiche per pieghe con varie orientazioni dell'asse e del piano assiale.

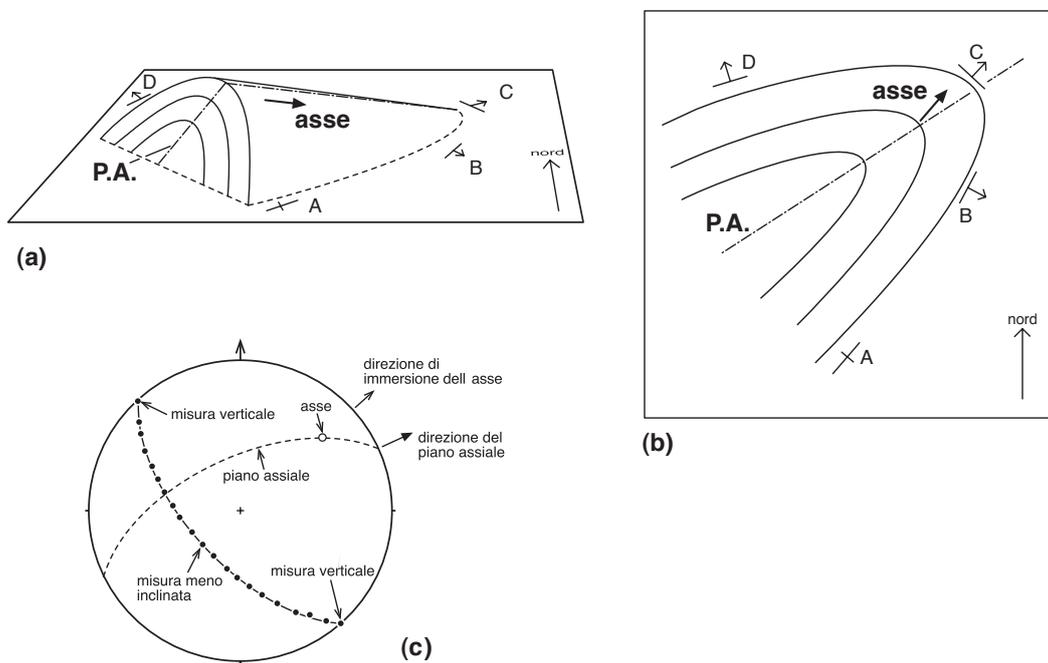


Figura 2.9 (a) Piega con asse inclinato e piano assiale inclinato. (b) La solita piega in una carta geologica. (c) Rappresentazione stereografica degli elementi della piega.

3

Giacitura da sondaggi inclinati

In molte aree nel sottosuolo le rocce presentano strutture planari primarie (stratificazione) o di natura tettonica (foliazione, scistosità, clivaggio, ecc.) non orizzontali, e mancano livelli guida facilmente riconoscibili. Se in aree con queste caratteristiche vengono effettuati dei sondaggi, dall'analisi geometrica delle carote dei sondaggi è possibile determinare la giacitura della stratificazione (o foliazione) in profondità, se la giacitura è costante (superfici planari, non piegate) tra i vari sondaggi. Questo problema è frequente in aree interessate da ricerca mineraria, dove giacimenti di minerali utili spesso sono paralleli alla stratificazione o alla foliazione.

Quando vengono effettuati dei sondaggi il nucleo (carota) del sondaggio viene portato in superficie ed è possibile osservare le tracce della stratificazione (o foliazione) sulla carota. Quello che invece non è quasi mai possibile conoscere è l'orientazione originaria della carota, cioè la posizione della carota nella roccia, perché la carota ha subito una rotazione sconosciuta durante la sua estrazione. In questi casi la giacitura (immersione e inclinazione) della stratificazione può essere ricavata per mezzo delle proiezioni stereografiche se si dispongono delle informazioni provenienti da almeno tre sondaggi non paralleli tra loro.

Nella Fig. 3.1a è rappresentata una carota da un sondaggio con indicate le tracce della stratificazione, δ è l'angolo tra la stratificazione e l'asse della carota (e del sondaggio). Poiché la carota durante la sua estrazione ha subito una rotazione sconosciuta, il polo della stratificazione ha subito una rotazione sconosciuta attorno all'asse del sondaggio. La giacitura originaria (nella roccia) del polo della stratificazione è quindi una linea tra tutte quelle che descrivono un cono di apertura δ attorno all'asse del sondaggio di Fig. 3.1a.

Queste informazioni possono essere riportate in proiezione stereografica: l'asse del sondaggio è riportato come un punto (a_1 in Fig. 3.1b), il cono di apertura δ_1 è rappresentato da un piccolo cerchio. Il polo che rappresenta l'originaria giacitura della stratificazione si trova su questo piccolo cerchio, ma per localizzarlo esattamente sono necessarie ulteriori informazioni. Sono necessarie informazioni provenienti da altri sondaggi ubicati nelle vicinanze. Se è presente un altro sondaggio (sondaggio a_2 in Fig. 3.1b) anche per questo sondaggio sarà possibile misurare l'angolo tra l'asse del sondaggio e la normale alla stratificazione (angolo δ_2) e anche in questo caso sarà possibile disegnare il corrispondente piccolo cerchio. I due piccoli cerchi si incontreranno in due punti, questi due punti rappresentano due possibili orientazioni originarie della normale alla stratificazione.

Per eliminare ogni dubbio è necessario conoscere le solite informazioni provenienti da tre sondaggi. Se si riportano in proiezione stereografica i piccoli cerchi relativi a tre sondaggi, essi si incontreranno in un unico punto, questa linea sarà il polo della originaria giacitura della stratificazione (Fig. 3.2). Questo perché la il polo della stratificazione è l'unica linea che giace contemporaneamente sui tre coni.

La costruzione di piccoli cerchi come quelli in Fig. 3.2 può richiedere parecchio tempo, specialmente se si usa il diagramma di Schmidt, per velocizzare la risoluzione del problema

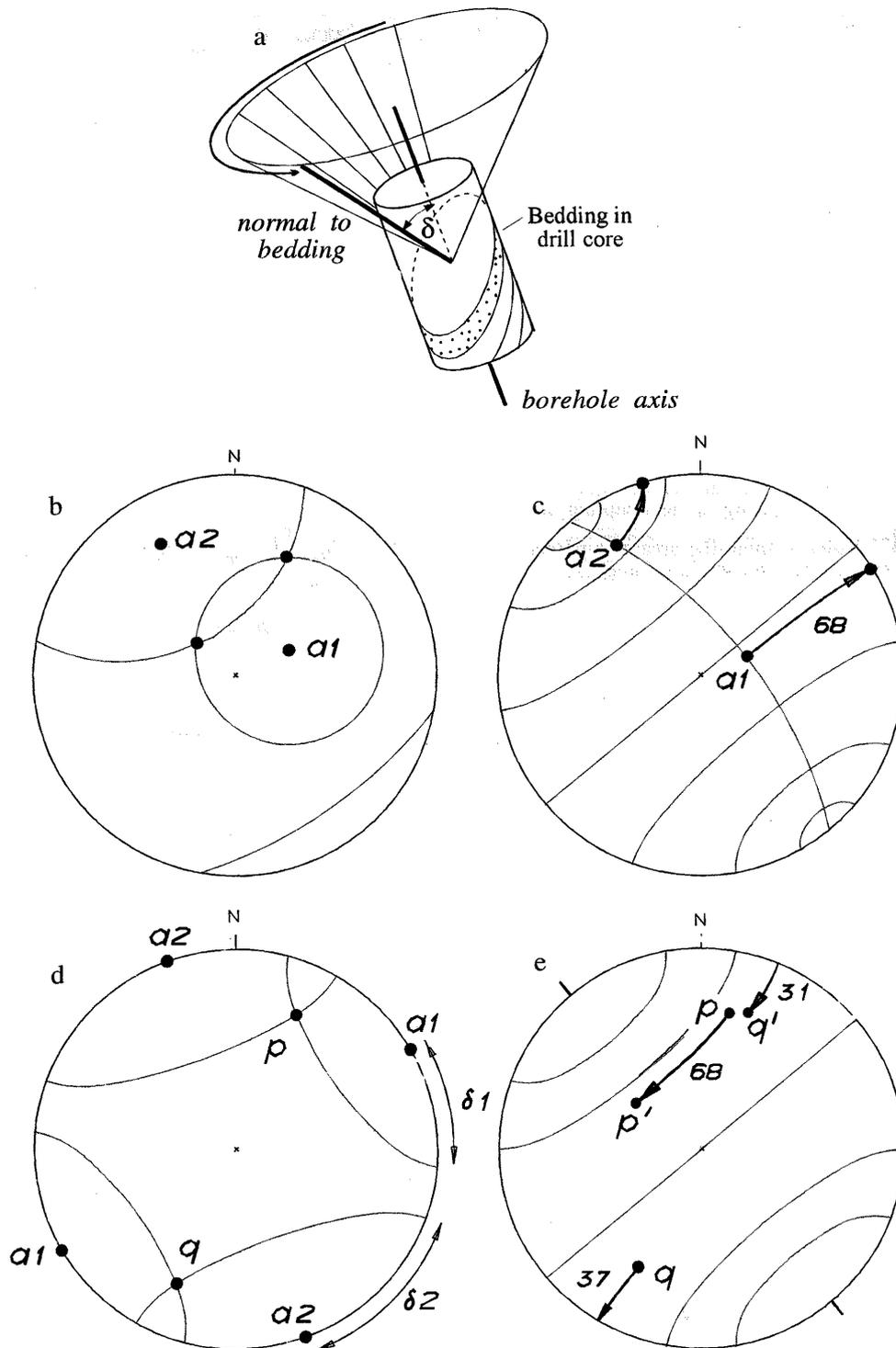


Figura 3.1 Giacitura della stratificazione da sondaggi inclinati mediante proiezioni stereografiche.

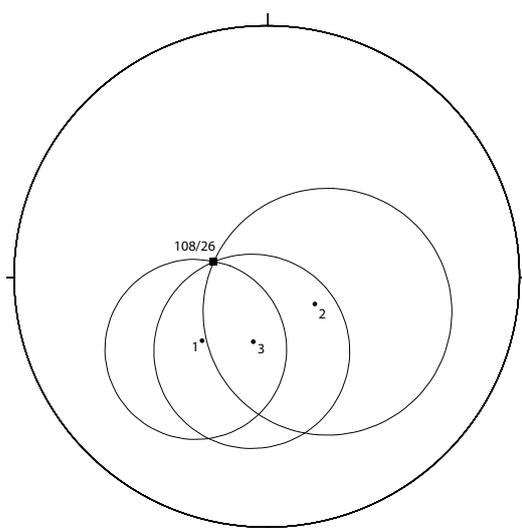


Figura 3.2 Informazioni per i seguenti tre sondaggi (immersione/inclinazione asse; angolo normale stratificazione/ asse sondaggio) sondaggio 1: 225/50, 35°; sondaggio 2: 120/65, 50°; sondaggio 3: 192/60,40°. L'intersezione tra i tre piccoli cerchi è il polo della stratificazione (giacitura 108/26). Reticolo di Wulff.

si può usare la costruzione che viene ora illustrata. Mentre è complicata la costruzione di piccoli cerchi relativi a coni con assi inclinati, è molto più facile la costruzione di piccoli cerchi per coni con assi orizzontale essendo gli archi di cerchio riportati nel net. La procedura è quindi la seguente:

- Riportare in proiezione stereografica le giaciture di solo una coppia di sondaggi (punti a_1 e a_2 in Fig. [fig:Fig. 3.1b).
- Ruotare fino a portare i due punti sulla stessa traccia ciclografica (Fig.Fig. 3.1c), questa traccia è il piano che contiene i due sondaggi.
- Ruotare questo piano secondo la sua direzione e riportarlo all'orizzontale, i due punti si muoveranno secondo i piccoli cerchi e avranno le nuove posizioni sull'equatore della proiezione stereografica (frecce in Fig. 3.1c). Nell'esempio di Fig. 3.1c è richiesta una rotazione di 62°
- Per le nuove posizioni dei punti a_1 e a_2 disegnare i relativi piccoli cerchi, ognuno con l'angolo di apertura rappresentato dall'angolo tra l'asse del sondaggio e il polo della stratificazione. i due piccoli cerchi si intersecheranno in due punti (p e q in Fig. 3.1d).
- Applicare ai punti p e q una rotazione inversa a quella applicata al punto 3 precedente. Questo viene fatto ruotando lo stereogramma e riportandolo alla posizione che si aveva al punto 3 e muovendo i due punti dei soliti gradi della rotazione del punto 3 (62° , Fig. 3.1e).
- Le nuove posizioni dei due punti (p' e q' in Fig. 3.1e) sono le due possibili intersezioni dei due coni per i due sondaggi.

La solita procedura si applica alle altre due coppie di sondaggi (a_1 e a_3 e poi a_2 e a_3). Si troveranno sempre due coppie di punti, ma un punto sarà comune a tutte le costruzioni, questa sarà il polo della originaria giacitura della stratificazione.

4

Restaurazione di strati inclinati, discordanze e paleocorrenti

Con l'uso delle proiezioni stereografiche è possibile effettuare rotazioni di piani e linee attorno ad assi verticali, orizzontali o inclinati. Tra i vari problemi geologici che richiedono la rotazione attorno ad un asse per essere risolti ricordiamo la restaurazione della giacitura di strati al di sotto di una discordanza e la restaurazione della direzione di paleocorrenti.

4.1 Restaurazione di strati inclinati e discordanze

In campagna spesso ci si trova di fronte a strati inclinati e a superfici di discordanza inclinate, con l'aiuto delle proiezioni stereografiche è possibile ricavare la giacitura degli strati prima del piegamento che ha prodotto l'inclinazione della stratificazione nell'area.

Supponiamo di avere in un'area due formazioni (A e B in Fig. 4.1), separate da una discordanza. Poiché gli strati della formazione A formano un angolo con la discordanza, significa che la formazione A era stata deformata prima dell'erosione e della deposizione della formazione B. Siccome anche la formazione B è inclinata, un piegamento ha avuto luogo anche successivamente alla deposizione della formazione B.

Se vogliamo conoscere la giacitura della formazione A prima dell'ultimo evento deformativo, quello che ha interessato anche la formazione B, dobbiamo procedere nel seguente modo:

- a) Se non ci sono altre informazioni circa gli assi delle pieghe che hanno prodotto la deformazione nell'area, si assume che gli strati della formazione B sono stati inclinati da pieghe con asse orizzontale e direzione parallela a quella degli strati stessi (direzione N 20E). È attorno a questo asse che sarà effettuata la retrorotazione degli strati.
- b) Si riportano in proiezione stereografica i poli della stratificazione per la formazione A e B (Fig. 4.1b).
- c) Si riporta l'asse di rotazione R e si ruota il lucido fino a portare l'asse R a coincidere con il Nord del net (Fig. 4.1c).
- d) Si porta il polo della formazione B all'orizzontalità, cioè al centro dello stereogramma nel punto B'. Si legge quant'è in gradi la rotazione necessaria per raggiungere l'orizzontalità (30° nell'esempio di Fig. 4.1c).
- e) Si ruota anche il polo della formazione A della stessa quantità (30°) e nel solito senso attorno al solito asse, muovendoci lungo i piccoli cerchi. Il polo di A assume la nuova posizione A'.
- f) Si riporta anche la traccia ciclografica del polo A' (Fig. 4.1d).
- g) A' è il polo della stratificazione della formazione A prima del piegamento che ha inclinato la discordanza e la formazione B. Questa giacitura è illustrata in Fig. 4.1e e nella proiezione stereografica di Fig. 4.1f

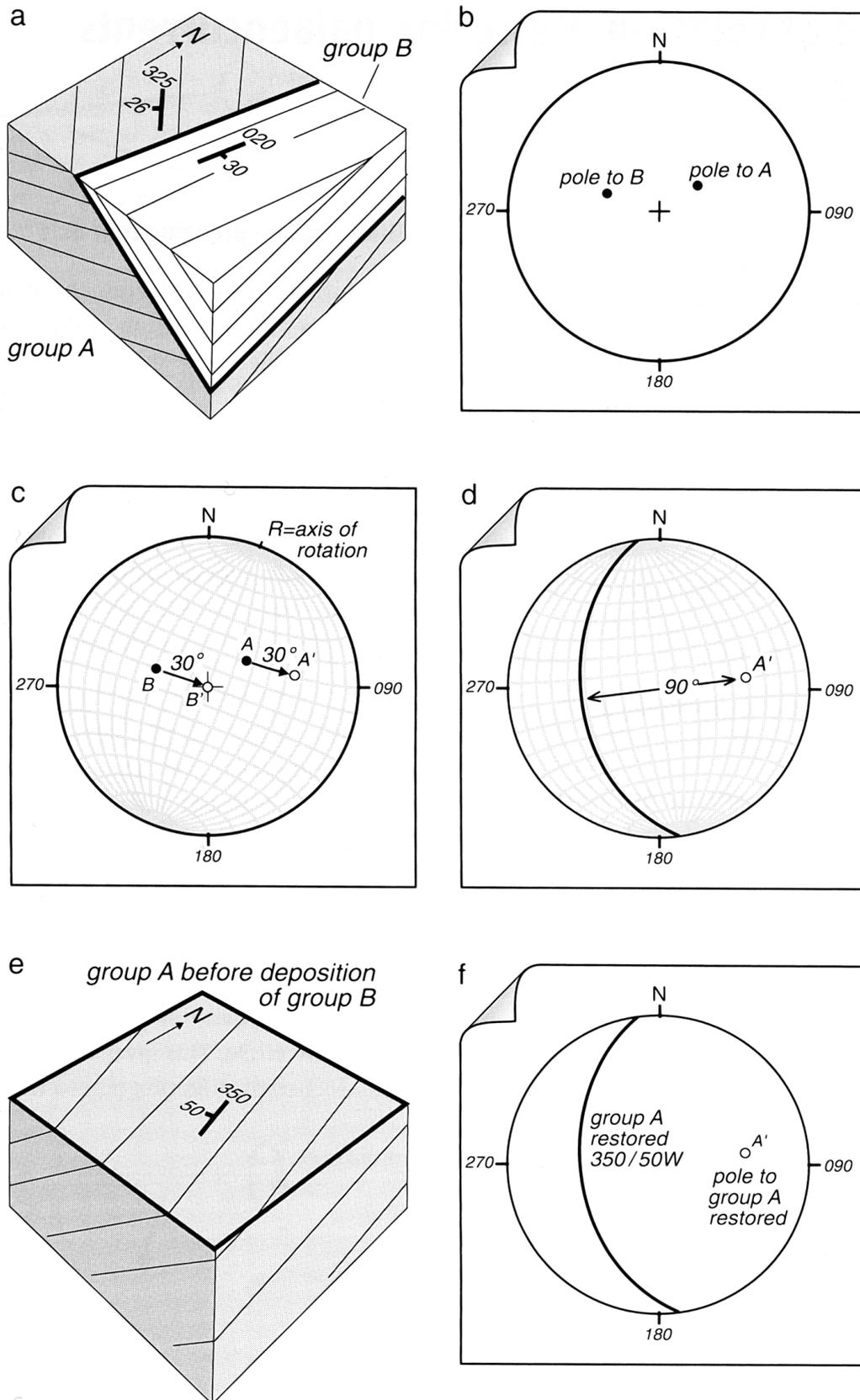


Figura 4.1 Esempio di rotazione attorno ad un asse orizzontale di strati e discordanze.

4.2 Restaurazione di paleocorrenti

Una grande varietà di strutture sedimentarie lineari (*flute cast*, ecc.) forniscono informazioni sulla direzione della corrente al momento della sedimentazione. In aree in cui gli strati sono inclinati a seguito di successivi piegamenti la misura diretta in campagna di queste strutture lineari non fornisce l'originaria direzione della corrente, ma è necessaria una restaurazione, cioè un retrorotazione che tenga conto dell'inclinazione subita durante il piegamento. Sono possibili due differenti situazioni:

- a) presenza di strati inclinati a seguito di piegamento con asse orizzontale o asse sconosciuto;
- b) presenza di strati inclinati a seguito di piegamento con asse inclinato.

4.2.1 Strati inclinati con asse orizzontale

Se le paleocorrenti si trovano su strati inclinati a seguito di piegamento in pieghe con asse orizzontale o asse sconosciuto, per conoscere l'originaria orientazione della paleocorrente gli strati e le paleocorrenti misurati in campagna devono essere retro-ruotate attorno ad un asse orizzontale che ha la direzione degli strati (Fig. 4.2a).

Si procede nel seguente modo:

- a) Riportare in proiezione stereografica la linea che rappresenta la paleocorrente (L in Fig. 4.2b) e la direzione (strike) dello strato.
- b) Portare la direzione dello strato a coincidere con il Nord del net, cioè con il centro di tutti i piccoli cerchi.
- c) Ruotare la linea che rappresenta la paleocorrente fino all'orizzontalità, muovendola lungo il corrispondente piccolo cerchio. L'orientazione della paleocorrente prima del piegamento è L' (Fig. 4.2b).

Il senso di rotazione lungo il piccolo cerchio dipende dalla giacitura dello strato. Se gli strati sono in giacitura dritta (Fig. 4.2a) l'angolo di retrorotazione richiesto è minore di 90° . Se gli strati sono in giacitura rovesciata (Fig. 4.2c) la paleocorrente sarà riportata all'orizzontalità attraverso un angolo di rotazione che sarà maggiore di 90° ma minore di 180° (Fig. 4.2d).

4.2.2 Strati inclinati con asse inclinato

Se le paleocorrenti si trovano su strati inclinati a seguito di piegamento in pieghe con asse inclinato, per semplicità si assume che questo piegamento è il risultato di un primo piegamento attorno ad un asse orizzontale, seguito da un altro piegamento attorno ad un altro asse sempre orizzontale, ma ortogonale rispetto al precedente. La restaurazione dell'orientazione delle paleocorrenti in questo caso è una procedura che necessita di due rotazioni successive. Si procede nel seguente modo:

- a) Si riporta in proiezione stereografica l'asse della piega misurato in campagna e la paleocorrente (f e L in Fig. 4.2f).
- b) Si trova il primo asse di rotazione orizzontale, è l'asse la cui direzione è ortogonale a quella dell'asse misurato.
- c) Si porta questo primo asse di rotazione orizzontale a coincidere con il Nord del net e in questa posizione si porta all'orizzontalità l'asse misurato in campagna muovendolo sul corrispondente piccolo cerchio fino alla posizione f' (Fig. 4.2f). Misurare l'angolo richiesto per questa rotazione. Muovere anche la linea che rappresenta la paleocorrente dello stesso valore angolare fino alla nuova posizione L'.
- d) A questo punto si opera la seconda rotazione, la linea nella posizione L' va ruotata fino all'orizzontalità attorno all'asse f'. Per fare questo, come in precedenza, si porta f' a coincidere con il Nord del net e si muove la linea sul corrispondente piccolo cerchio fino all'equatore del cerchio di proiezione (Fig. 4.2h).

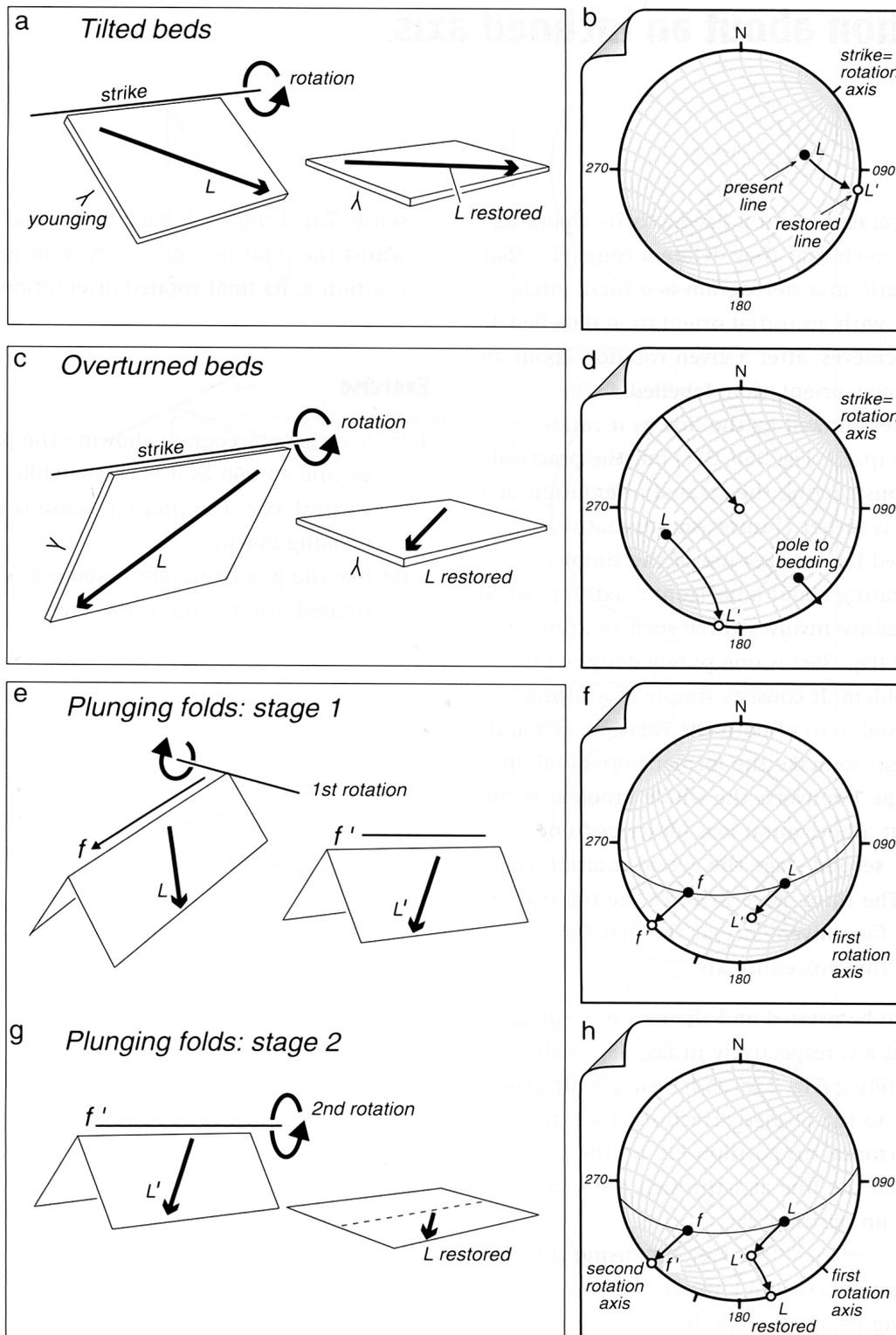


Figura 4.2 Esempio di restaurazione di paleocorrenti.

5

Analisi cinematica di faglie

5.1 Faglie e meccanismi focali

In sismologia le proiezioni stereografiche sono utilizzate comunemente per rappresentare le soluzioni dei meccanismi focali di terremoti. Consideriamo la superficie di faglia lungo cui si è avuto movimento che ha generato un sisma, schematizzata in Fig. 5.1, si individueranno 4 aree, due in cui si ha compressione (movimento verso l'alto del suolo) e due in cui si ha estensione (movimento verso il basso del suolo). Queste aree sono individuate dall'intersezione tra la superficie di faglia e un piano ausiliario (ortogonale alla faglia e alla direzione di movimento lungo la faglia). In proiezione stereografica le quattro aree hanno una rappresentazione tipo quella riportata in Fig. 5.2.

Sempre nello studio dei meccanismi focali dei terremoti si indicano con la lettera P (“pressione”) e T (“tensione”) due direzioni ortogonali all'intersezione tra il piano di faglia e il piano ausiliario e a 45° con il piano di faglia e il piano ausiliario. Queste due direzioni sono in un evento sismico la direzione di maggior estensione (T) e la direzione di maggior raccorciamento (P). La Fig. 5.3 mostra l'orientazione degli assi P e T nel caso di faglie trascorrenti, faglie inverse e faglie normali.

Dalla meccanica delle rocce sappiamo che nel caso ideale di un corpo continuo e isotropo in un campo di sforzi triassiale, i due piani coniugati di massimo sforzo di taglio sono i piani su cui potenzialmente si svilupperanno faglie e fratture e sono orientati a 45° rispetto a σ_1 e a σ_3 e paralleli a σ_2 . Per questo motivo talvolta gli assi T e P sono considerati come le direzioni degli sforzi principali σ_1 e σ_3 . Questo non è corretto perché T e P sono direzioni di massimo raccorciamento ed estensione e non coincidono necessariamente con σ_1 e σ_3 , perché spesso può accadere che il movimento sia su una superficie di faglia pre-esistente, oppure i piani di faglia non siano a 45° rispetto a σ_1 e σ_3 , ma piuttosto formano un angolo di 30° con σ_1 in quanto bisogna considerare l'effetto della pressione di confinamento sull'orientazione delle fratture.

Si può comunque affermare, con una certa approssimazione, che generalmente il σ_3 è circa parallelo all'asse T e il σ_1 è circa parallelo all'asse P.

5.2 Analisi cinematica di faglie

Vari tipi di analisi cinematica di faglie che si basano su metodi grafici sono stati proposti, in queste dispense prenderemo in considerazione il “metodo degli assi P e T” proposto da

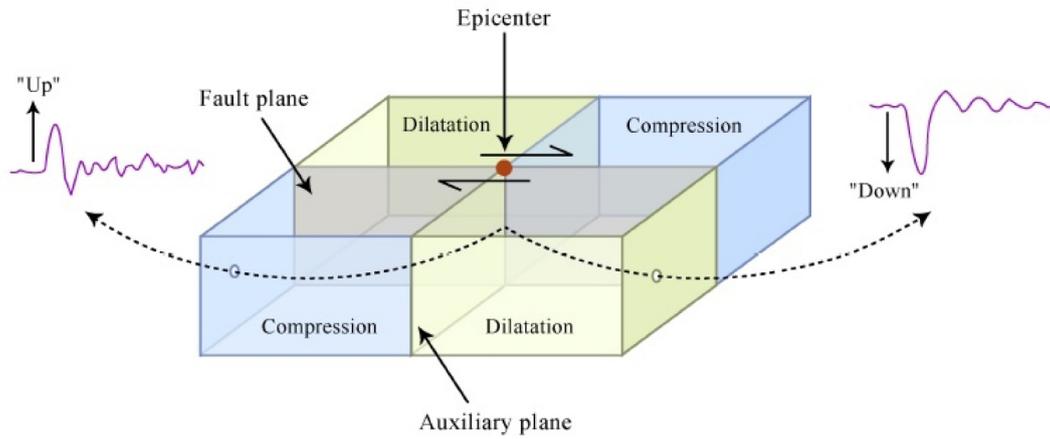


Figura 5.1 Aree in compressione ed in estensione a seguito di un evento sismico.

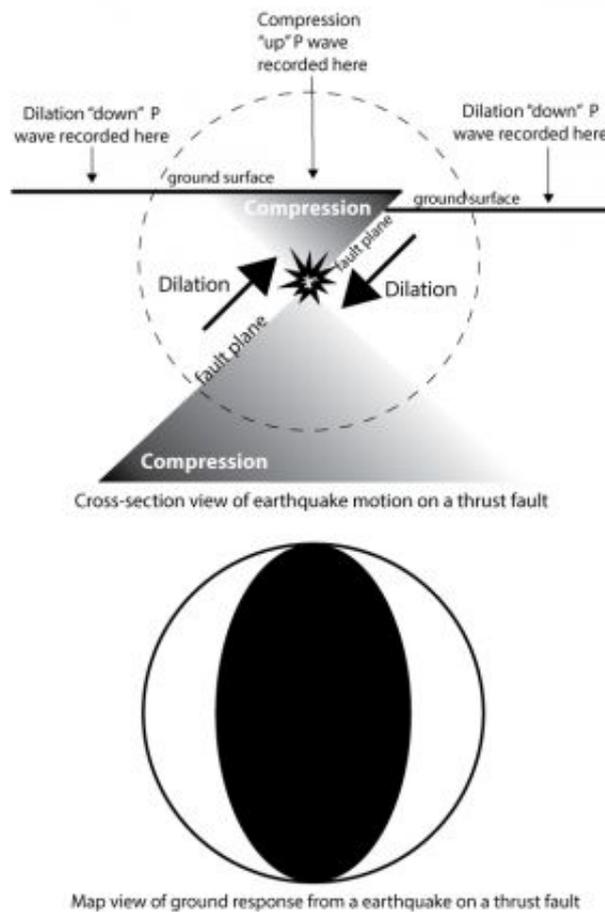


Figura 5.2 Aree in compressione ed in estensione in proiezione stereografica, per faglie inverse. Solitamente le aree in proiezione stereografica che rappresentano direzioni in cui si ha compressione sono rappresentate con colori scuri o in nero, le aree in cui si ha estensione con colori chiari o in bianco.

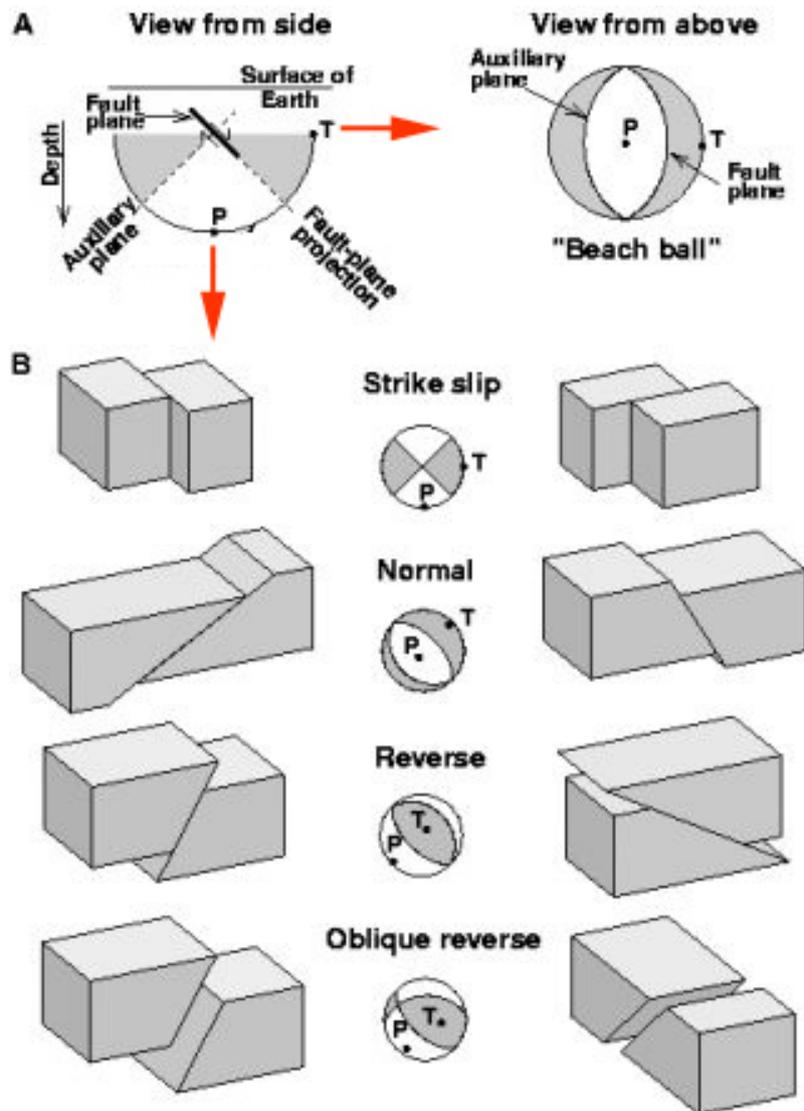


Figura 5.3 Assi P e T per vari tipi di faglie.

Marrett e Allmendinger ¹ e il “metodo dei diedri P e T” proposto da Angelier e Mechler ².

5.2.1 Metodo degli assi P e T

Questo metodo, proposto da Marrett e Allmendinger (1990), si basa sul fatto che sebbene con una certa approssimazione, il σ_3 è circa parallelo all’asse T e il σ_1 è circa parallelo all’asse P. Quindi una certa popolazione di faglie (faglie normali, trascorrenti, inverse) che si sono formate nel solito campo di sforzi devono mostrare assi P e T circa paralleli. Se si elaborano statisticamente i dati relativi a tale famiglia di faglie, le direzioni P e T più frequenti sono quindi probabilmente quelle dell’orientazione di σ_1 e σ_3 .

Nella pratica per ogni faglia si procede in questo modo (Fig. 5.4):

- a) si riporta in proiezione stereografica la superficie di faglia come traccia ciclografica;
- b) si riportano come un punto le strie misurate lungo la faglia, che indicano la direzione di movimento dei due blocchi (*slip direction*);
- c) al punto che rappresenta le strie si aggiunge una freccia che indica il senso di movimento lungo la faglia, la freccia indica la direzione di movimento del tetto;
- d) sul piano ortogonale alla faglia e che contiene le strie vanno riportati gli assi P e T, che sono a 45° dalla *slip direction* e tra loro a 90°:
 - i. l’asse di estensione T è quello verso cui è rivolta la freccia della *slip direction*;
 - ii. l’asse di raccorciamento P si trova invece dalla parte opposta alla freccia della *slip direction*.

La Fig. 5.4 illustra un esempio di faglie che immergono verso Sud e le direzioni di movimento sul piano di faglia (*slip direction*) sono secondo la linea di massima pendenza (*down-dip*). La Fig. 5.5 mostra invece degli esempi per faglie in cui le *slip direction* non sono down-dip ma il pitch della linea sulla faglia è minore di 90°.

Se si riportano in proiezione stereografica gli assi P e T per un certo numero di faglie (dirette, inverse, trascorrenti) e le direzioni di P e T circa coincidono (o comunque hanno dei massimi significativi), è ragionevole supporre che le faglie sono tra loro cinematicamente compatibili e possono essersi formate nella stessa fase tettonica, nel solito campo di sforzi. Se invece gli assi P e T hanno direzioni tra loro molto diverse le faglie quasi sicuramente si sono formate in campi di stress differenti.

Esercizio 18

In una certa area sono presenti una serie di faglie, lungo cui è riconoscibile il senso di movimento. In Tab. 5.1 sono riportate le misure delle superfici di faglia, con relative strie e indicazione del movimento lungo la superficie. Riportare tutte le superfici in proiezione stereografica e per ogni faglia determinare gli assi P e T. Valutare se le faglie sono cinematicamente compatibili e determinare l’orientazione di P e T, con l’aiuto di elaborazione statistica con contouring. Soluzione dell’esercizio in Fig. 7.9 a pagina 38.

5.2.2 Metodo dei diedri P e T

Questo metodo, proposto da Angelier e Mechler (1974), si basa sul fatto che in una certa area sottoposta ad un campo di sforzi ci può essere formazione di nuove faglie, ma alcune faglie che si osservano possono essere faglie precedenti che vengono riattivate; nel caso di faglie riattivate ci possono essere importanti differenze tra l’orientazione σ_1 e l’orientazione dell’asse P (ricostruito dalla giacitura della superficie di faglia e delle strie). Sicuramente per poter avere movimento su una certa superficie di faglia lo sforzo principale σ_1 deve cadere

¹Marrett R. & Allmendinger R.W. (1990) - Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology*, 12 (8), 973–986.

²Angelier J. & Mechler P. (1977) - Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales également utilisables en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bulletin de la Société géologique de France*, 19 (6), 1309–1318.

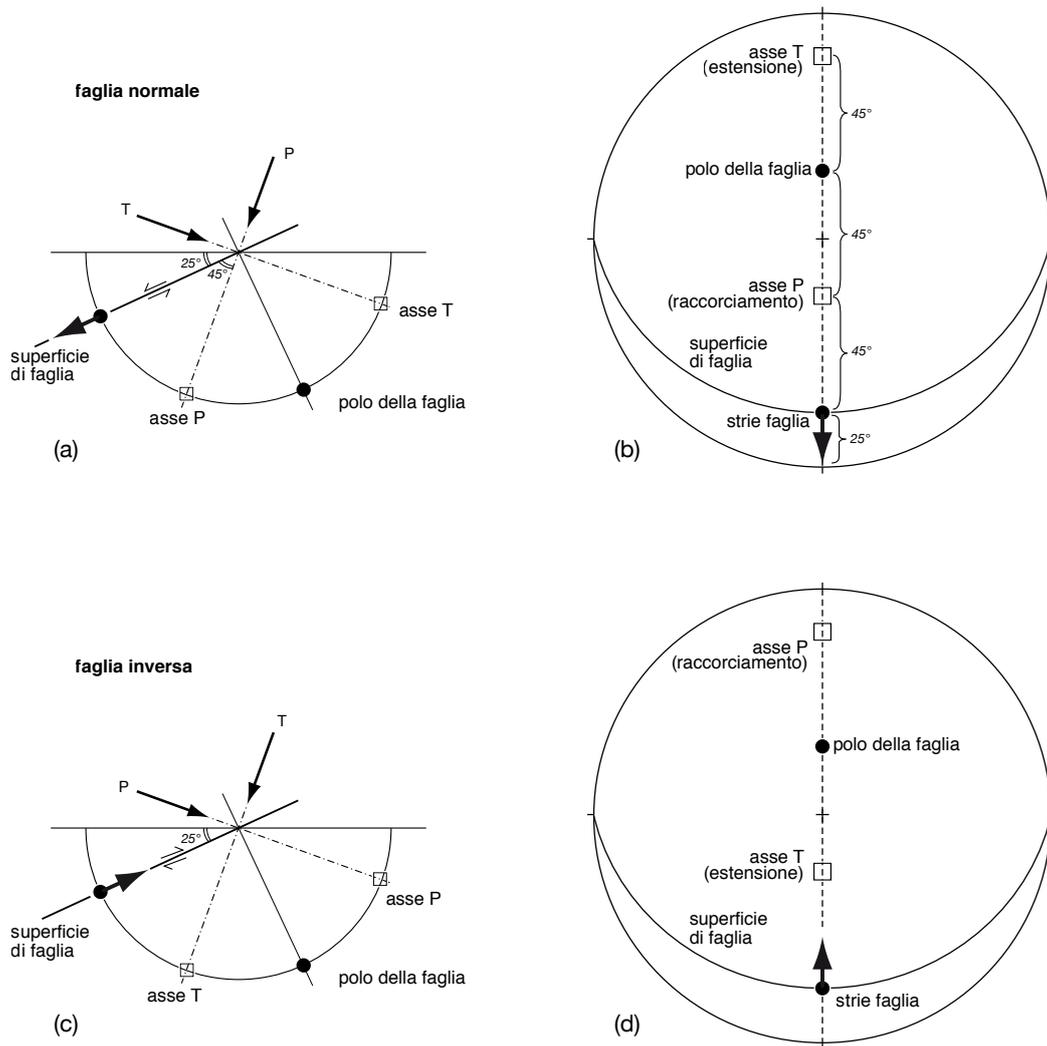


Figura 5.4 (a) Faglia normale, vista laterale, con orientazione degli assi P e T. Nell'esempio la faglia ha giacitura 180/25 e le strie che indicano movimento hanno giacitura 180/25. (b) Solita faglia normale in proiezione stereografica. La freccia posta nel punto che rappresenta le strie di faglia indica il senso di movimento lungo la faglia e per convenzione la freccia indica sempre la *direzione di movimento del tetto* della faglia. A tratteggio è riportato il piano ortogonale alla superficie di faglia e che contiene la direzione di movimento lungo la faglia. (c) e (d) Stessa rappresentazione, per una faglia inversa.

Tabella 5.1 Dati da usare con l'Esercizio 18: T=thrust/faglie inverse, .

n.	Faglia		Strie		Senso movimento
	Dir.	Inmers.	Dir.	Inmers.	
1	88	53	104	52	T
2	300	40	272	37	T
3	276	31	258	30	T
4	100	55	98	55	T
5	93	79	158	65	T
6	279	80	196	35	T
7	281	52	284	52	T
8	284	52	335	39	T
9	306	70	264	64	T
10	296	61	278	60	T

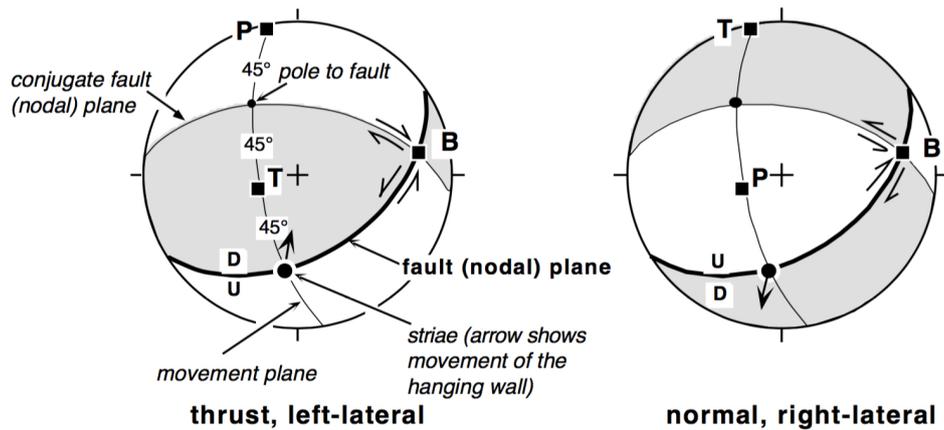


Figura 5.5 Assi T e P nel caso di una faglia inversa (thrust) e faglia normale.

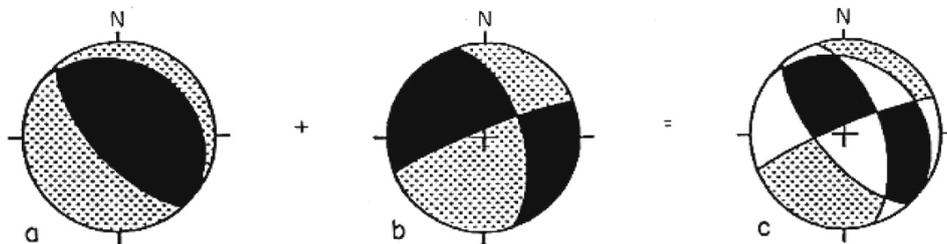


Figura 5.6 Principio del metodo dei diedri P-T. (a) e (b) Proiezione stereografica di due faglie, in nero è il diedro in estensione, in puntinato grigio è il diedro in compressione. (c) Risultato della sovrapposizione dei diedri delle due faglie: in puntinato grigio è l'area con maggior probabilità di contenere σ_1 , in nero quella per σ_3 , in bianco aree incompatibili con entrambi.

all'interno del diedro (quadrante) in compressione che contiene l'asse P (aree in bianco in Fig. 5.3).

Questo metodo si basa quindi sul fatto che per una certa popolazione di faglie il σ_1 applicato deve essere comune a tutti i diedri P e il σ_3 applicato deve essere comune a tutti i diedri T. In altre parole l'orientazione in cui ricadono il maggior numero di diedri P è la direzione più probabile dell'orientazione di σ_1 , lo stesso per i diedri T e σ_3 .

6

Applicazione a problemi di geologia applicata

Esercizio 19

Nella cava di marmo di Fig. 6.1 sono state misurate le intersezioni tra la scistosità nel marmo e i due fronti di cava: 280/32 e 350/60, rispettivamente. Determinare mediante proiezioni stereografiche la giacitura della foliazione (= l'andamento dei principali "corsi" del marmo). Soluzione in Fig. 7.6 a pagina 36.

Esercizio 20

Un livello di carbone mostra un'inclinazione apparente di 18° verso NE al fronte di uno scavo minerario verticale di direzione (strike) N030° E, e un'inclinazione apparente di 40° verso SE al fronte di uno scavo minerario verticale di direzione (strike) N112° E. Determinare la reale giacitura (immersione e inclinazione) del livello di carbone.

Esercizio 21

In una successione filladica è intercalato uno strato di marmo con orientazione 36/52. Il marmo è intruso da un filone tabulare mafico di orientazione 250/64. Il filone provoca una metamorfismo di contatto e una mineralizzazione nello strato di marmo. Trovare l'orientazione (immersione e inclinazione) della mineralizzazione.

Esercizio 22

In un'area una successione stratigrafica è orientata 320/44. Calcolare l'angolo tra la stratificazione e una galleria di prossima costruzione orientata 268/8.

Esercizio 23

In un'area mineraria due mineralizzazioni a barite sono localizzate in cataclasi lungo due zone di taglio che si intersecano, di orientazione 41/60 e 130/30, rispettivamente. Si vuole realizzare una galleria mineraria che sia orogonale all'intersezione tra le due zone di taglio e che per motivi di sicurezza sia ugualmente distante dalle due zone di taglio. Con l'aiuto di proiezioni stereografiche determinare l'orientazione che deve avere la futura galleria.

Esercizio 24

Una cava di granito è interessata da due sistemi di fratturazione F1=250/60 e F2=160/62, che isolano dei blocchi (cunei) di granito. il fronte di cava è orientato 200/63. Valutare approssimativamente se sono possibili scivolamenti dei blocchi nell'area di cava o se si tratta di una cava sicura (la cava è sicura se l'intersezione tra le due discontinuità non "viene a giorno". Valutare se la cava è sicura nel caso il fronte di cava sia orientato 45/58. Si noti che l'intersezione "viene a giorno" se essa è meno inclinata del fronte di cava (vedi Fig. Fig. 6.2).

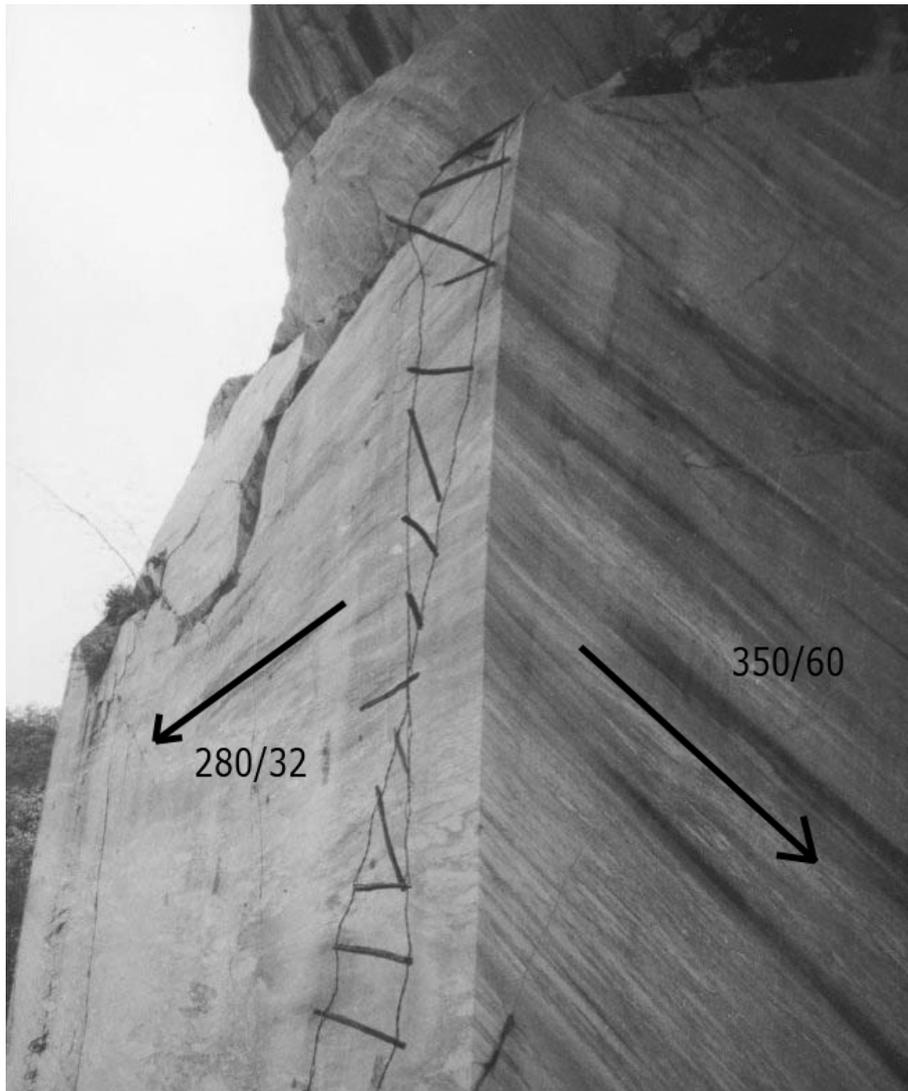


Figura 6.1 Cava di marmo in cui sono visibili due fronti di cava, determinare la giacitura della foliazione.

Esercizio 25

Al di sotto di spesse coperture quaternarie è presente una successione sedimentaria con giacitura della stratificazione inclinata, la stratificazione non è misurabile in campagna. Sono stati effettuati tre sondaggi con l'orientazione riportata nella Tab. 6.1 nella pagina successiva. È possibile misurare l'angolo tra l'asse del sondaggio e la normale (polo) della stratificazione. Determinare con l'aiuto delle proiezioni stereografiche la giacitura della stratificazione nel sottosuolo. Si consiglia di utilizzare il reticolo di Wulff. (I principi per la soluzione di questo esercizio sono illustrati nel Capitolo 3 a pagina 15).

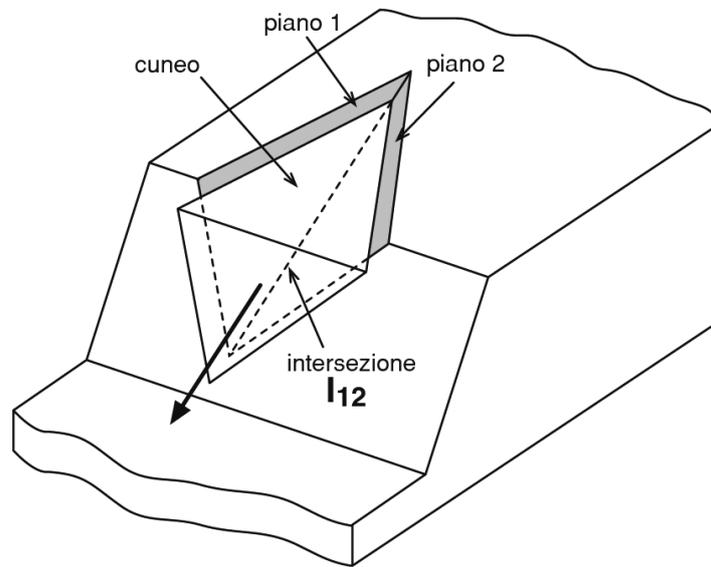


Figura 6.2 Schema di scivolamento di un cuneo su due superfici di discontinuità (piano 1 e piano 2).

Tabella 6.1 Dati per l'Esercizio 25.

<i>sondaggio</i>	<i>direzione/inclinazione del sondaggio</i>	<i>angolo sondaggio/polo della stratificazione</i>
1	10/70	20°
2	158/78	46°
3	338/45	33°

7

Soluzione degli esercizi

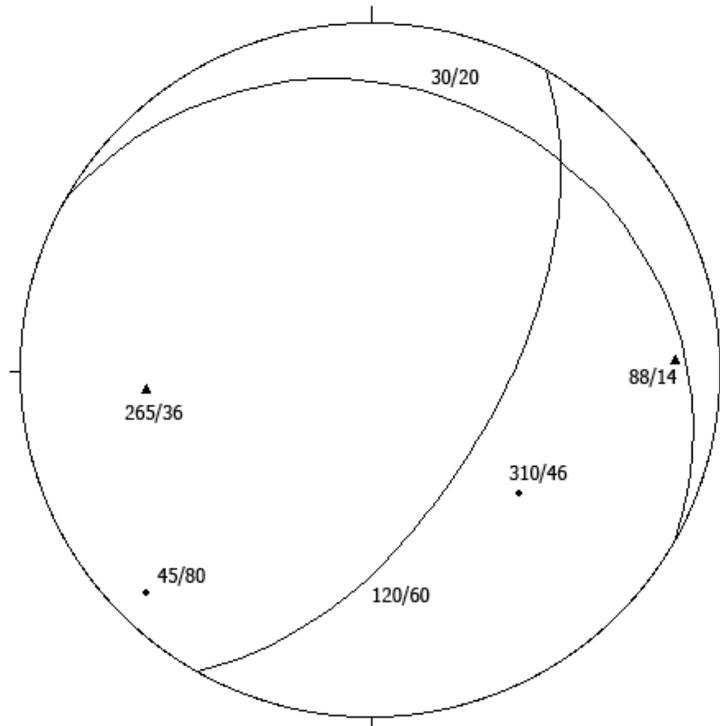


Figura 7.1 Soluzione Esercizio 1 a pagina 1.

Equal Area
Lower Hemisphere

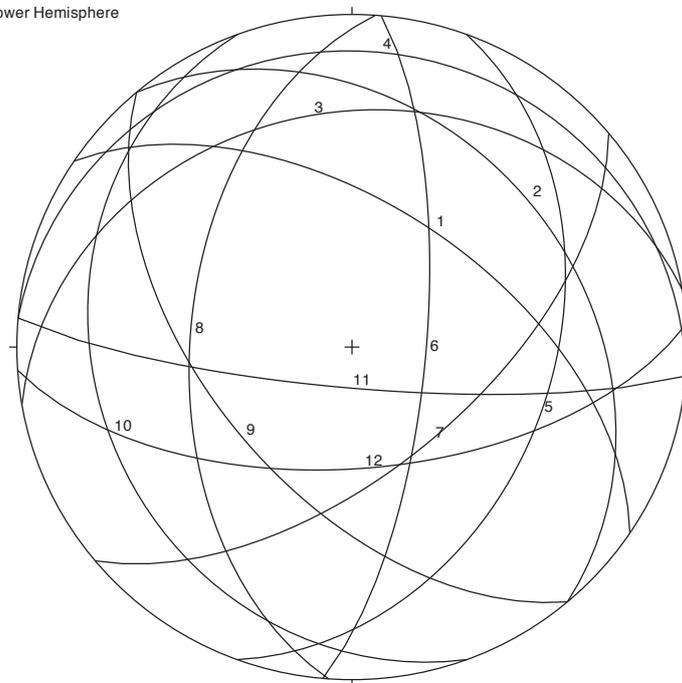


Figura 7.2 Soluzione Esercizio 2 a pagina 1.

Equal Area
Lower Hemisphere

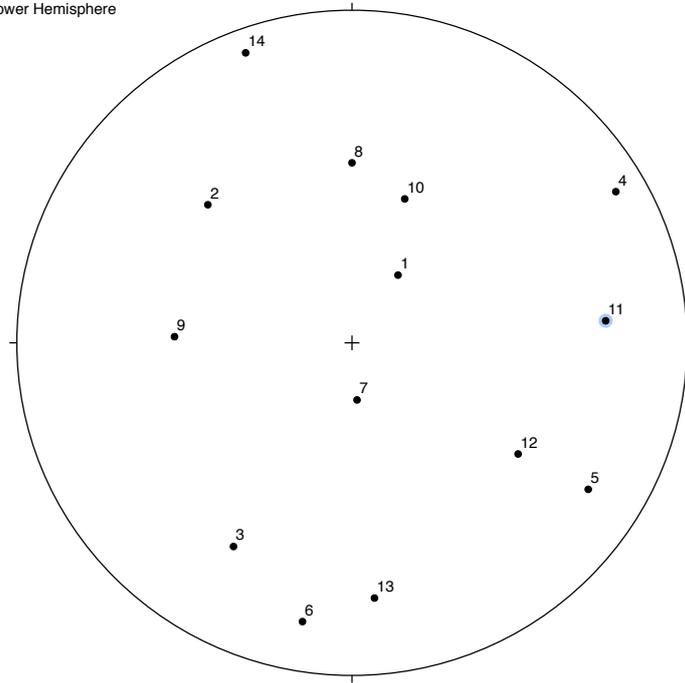


Figura 7.3 Soluzione Esercizio 3 a pagina 1.

Equal Area
Lower Hemisphere

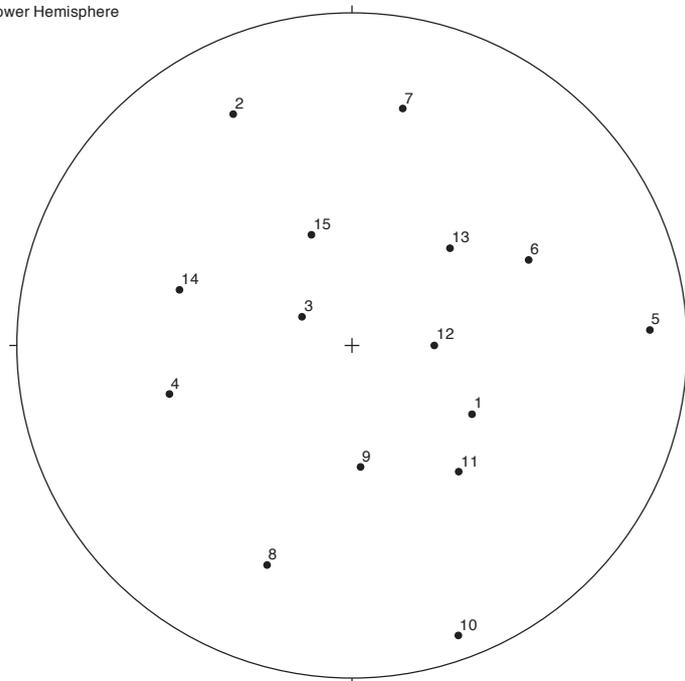


Figura 7.4 Soluzione Esercizio 4 a pagina 1.

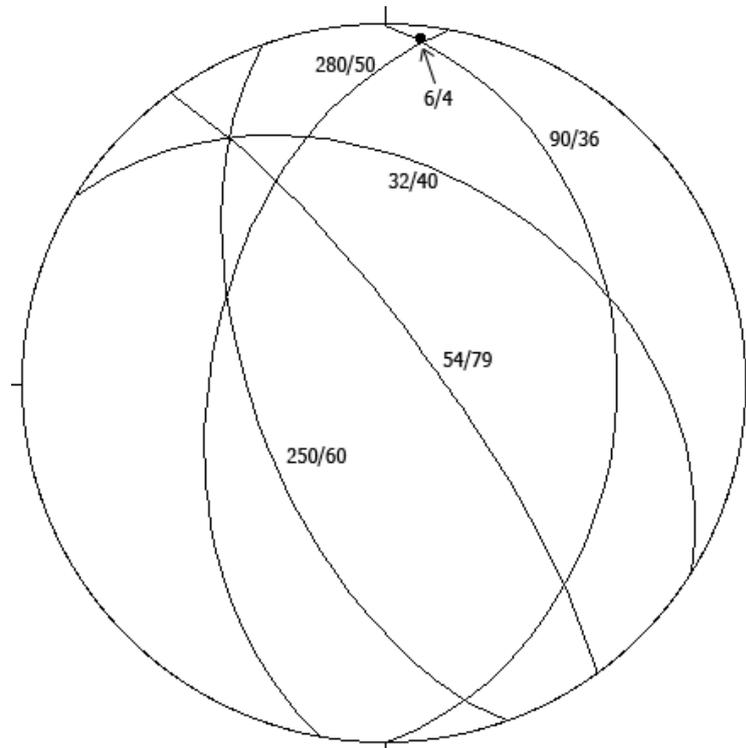


Figura 7.5 Soluzione Esercizio 5 a pagina 1. L'intersezione è $6/4$, il piano bisettore ha giacitura $54/79$.

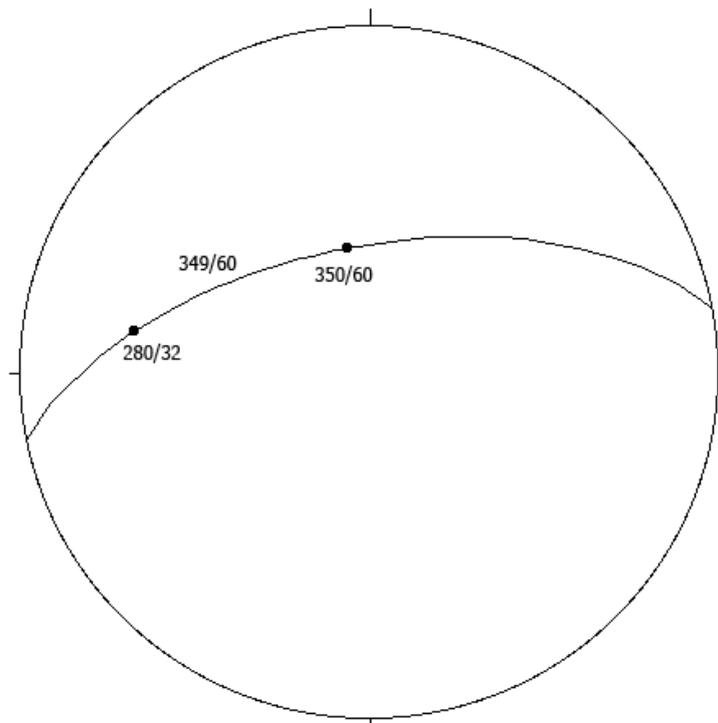


Figura 7.6 Soluzione Esercizio 19 a pagina 29. La foliazione ha giacitura $349/60$.

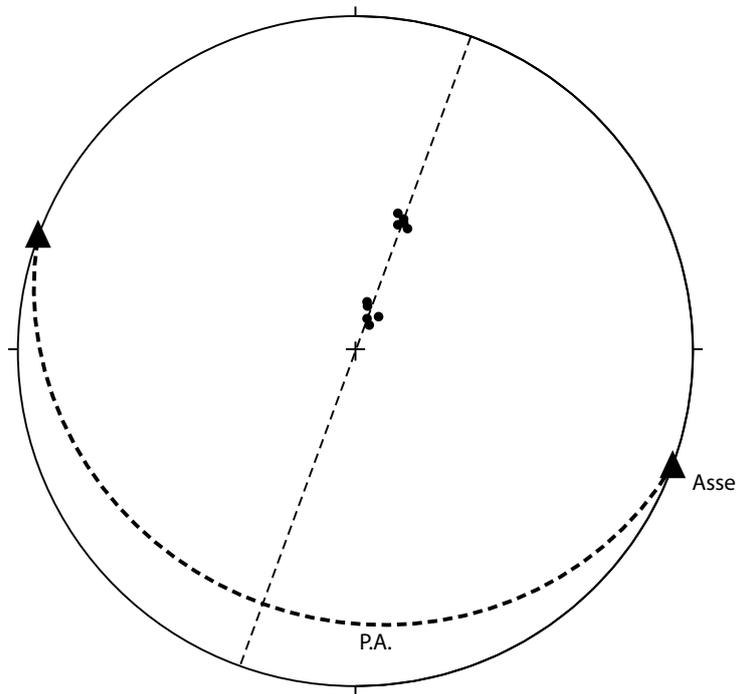


Figura 7.7 Soluzione Esercizio 17 a pagina 12. Asse=110/0, P.A.=200/21, $\alpha = 24^\circ$.

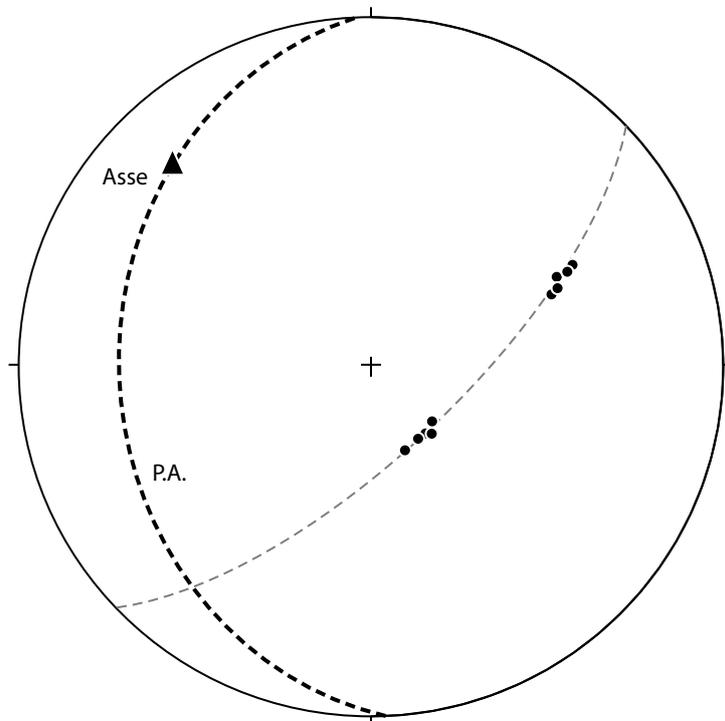
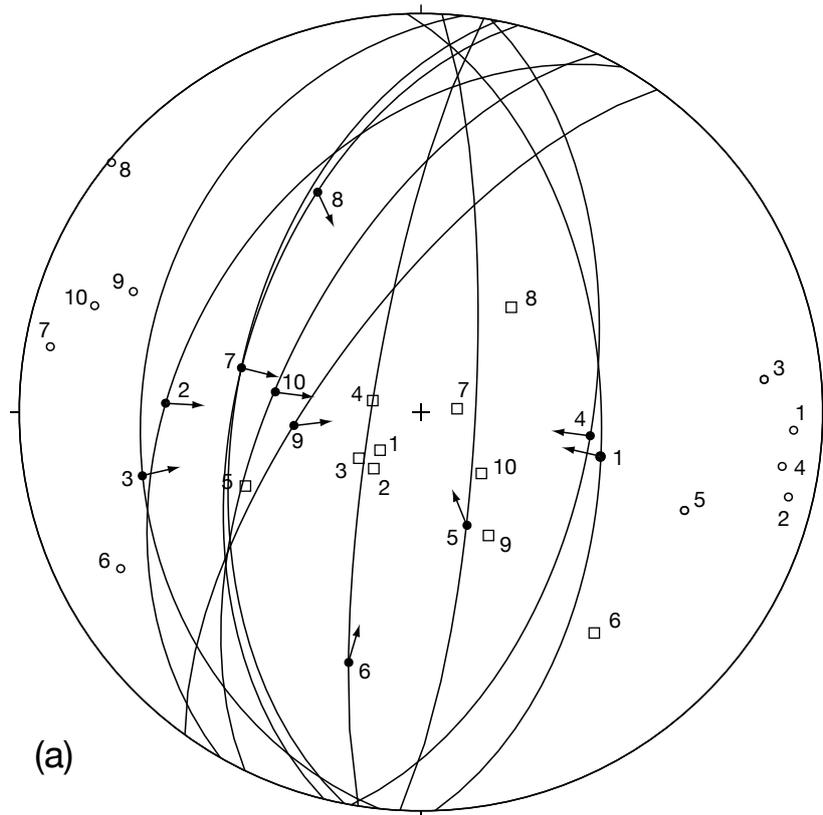
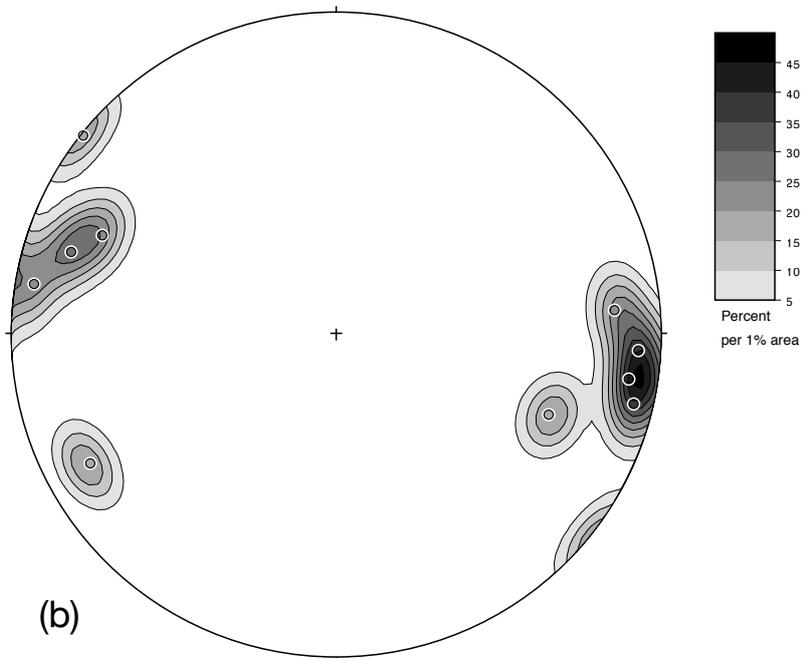


Figura 7.8 Soluzione Esercizio 17 a pagina 12. Asse=316/20, P.A.=268/30, $\alpha = 48^\circ$.



(a)

● strie, la freccia indica movimento del tetto
 ○ direzione di raccorciamento (asse P)
 □ direzione di estensione (asse T)



(b)

Figura 7.9 Soluzione Esercizio 18 a pagina 26. (a) Orientazione delle faglie, strie, assi P e T. (b) Contouring dell'orientazione degli assi P.