



UNIVERSITÀ
DI SIENA
1240

Carte e Sezioni Geologiche

Paolo Conti

Università di Siena
Centro di GeoTecnologie
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente

paolo.conti@unisi.it

2022

Paolo Conti

Centro di GeoTecnologie
Università degli Studi di Siena
Via Vetri Vecchi 33
52027 - San Giovanni Valdarno (AR)

paolo.conti@unisi.it
<https://geotecnologie.unisi.it>
<https://www.pconti.net>

Versione: 21 aprile 2022

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

Queste dispense sono liberamente scaricabili dal sito: <https://www.pconti.net>

Indice

Premessa	5
1 La carta geologica	7
1.1 Elementi di una carta geologica	7
1.2 Tipi di superfici geologiche	10
1.3 Misure	14
2 Forma degli affioramenti	17
2.1 Contatti geologici e topografia	17
2.1.1 Strati orizzontali	17
2.1.2 Strati verticali	20
2.1.3 Strati inclinati a reggipoggio	20
2.1.4 Strati inclinati a franapoggio con inclinazione maggiore del versante	22
2.1.5 Strati inclinati a franapoggio con inclinazione minore del versante	26
2.2 Estensione degli affioramenti e stratimetria	26
3 Curve di livello e inclinazione apparente	29
3.1 Curve di livello su superfici geologiche	29
3.2 Inclinazione reale e inclinazione apparente	30
3.3 Calcolo dell'inclinazione apparente	34
3.3.1 Metodi trigonometrici e grafici	34
3.3.2 Proiezioni stereografiche	35
4 Sezioni geologiche con il metodo delle curve di livello	39
5 Variazione della scala verticale	43
5.1 Esagerazione verticale	43
5.2 Calcolo dell'esagerazione verticale	44
6 Riconoscimento in carta di discordanze, faglie, pieghe	47
6.1 Discordanze	47
6.2 Faglie	48
6.2.1 Riconoscimento di faglie	48
6.2.2 Rigetto di una faglia	53

6.3	Pieghe	56
6.3.1	Riconoscimento di pieghe	56
6.3.2	Pieghe in carta	58
6.4	Sovrapposizione di pieghe e faglie	64
6.4.1	Pieghe in carta e in proiezione stereografica	67
7	Depositi quaternari e intrusioni	69
7.1	Depositi quaternari	69
7.2	Intrusioni	69
8	Sezioni geologiche	73
8.1	Introduzione	73
8.2	Interpretazione e sezioni geologiche	73
8.3	Scegliere l'orientazione della sezione	75
8.4	Fasi di realizzazione di una sezione geologica	76
8.5	Trasferire informazioni dalla carta alla sezione geologica	78
8.5.1	Sezione in superfici planari, sezione ortogonale alla direzione degli strati	78
8.5.2	Sezione in superfici planari, sezione obliqua rispetto alla direzione degli strati	81
8.5.3	Sezione in pieghe con asse orizzontale, sezione ortogonale all'asse delle pieghe	82
8.5.4	Sezione in pieghe con asse orizzontale, sezione obliqua rispetto all'asse delle pieghe	85
8.5.5	Sezione in pieghe con asse inclinato	85
9	Metodi degli archi di cerchio e delle bisettrici	89
9.1	Introduzione	89
9.2	Metodo degli archi di cerchio	90
9.3	Metodo delle bisettrici	92
10	Profili geologici	99
Appendici		
A	Pieghe in proiezione stereografica	105
A.1	Pieghe cilindriche	105
A.2	Angolo di apertura e piano assiale	105
A.3	Geometria del piegamento	109
A.4	Orientazione di pieghe	111
B	Ricostruzione di superfici geologiche	117
B.1	Superfici geologiche da dati di sottosuolo	117
B.2	Giacitura di contatti dalla carta geologica	119
B.3	Contatti geologici da informazioni puntuali	119
Bibliografia		124

Premessa

Queste dispense illustrano varie tecniche per la lettura e l'interpretazione di carte geologiche, finalizzate alla realizzazione di sezioni geologiche e alla risoluzione di alcuni problemi geologici particolari.

Una discussione dettagliata dei vari tipi di strutture geologiche, loro origine e sviluppo, non rientra tra i fini di queste dispense, di conseguenza verrà assunto che lo studente abbia familiarità con le varie strutture geologiche originate da processi sedimentari (contatti stratigrafici, discordanze, ecc.), magmatici (intrusioni, strutture vulcaniche, filoni, ecc.) e tettonici (pieghe, faglie, scistosità, lineazioni, piani assiali, anticlinali, sinclinali, antiforimi, sinforimi, ecc.). Queste dispense non sono pensate per un corso di Rilevamento geologico, non sono quindi illustrate le tecniche di rilevamento e di riconoscimento delle varie strutture geologiche sul terreno e come tutte queste informazioni si riportano su una carta geologica.

Viene assunto che lo studente conosca gli aspetti fondamentali della rappresentazione cartografica (scala, isoipse, ecc.), che sia in possesso delle basi per la lettura delle carte topografiche, quali il riconoscimento di valli, zone montuose, principali forme del rilievo e che sia in grado di realizzare profili topografici¹. In alcuni capitoli è necessario conoscere i metodi di realizzazione delle proiezioni stereografiche².

Varie sono le applicazioni delle Sezioni geologiche, anche nella geologica applicata, ma il loro utilizzo in campo applicativo non è discusso qui. Ugualmente non è discussa la realizzazione di sezioni geologiche bilanciate.

¹Per la realizzazione di profili topografici è disponibile la dispensa "Profili Topografici" scaricabile dal sito <https://www.pconti.net/dispense>

²Per la costruzione di proiezioni stereografiche è disponibile la dispensa "Proiezioni Stereografiche" scaricabile dal sito <https://www.pconti.net/dispense>

1

La carta geologica

1.1 Elementi di una carta geologica

Una carta geologica è la rappresentazione, su una base topografica, dei corpi rocciosi (formazioni) che affiorano sulla superficie terrestre, con informazioni circa la loro disposizione spaziale e i rapporti che esistono tra i diversi tipi di rocce. I diversi tipi di rocce vengono rappresentati in una carta geologica con l'uso di colori differenti, mentre con appositi simboli si forniscono informazioni sulla loro geometria (giacitura degli strati, foliazioni, fluidalità magmatica), i loro rapporti stratigrafici (contatti stratigrafici) o tettonici (faglie, sovrascorrimenti), oppure la presenza di località fossilifere, sorgenti, risorse minerarie.

Una carta geologica è suddivisa in varie parti e riporta solitamente le seguenti informazioni, alcune fondamentali e altre opzionali, che possono essere organizzate e disposte in modo differente (Fig. 1.1, Fig. 1.2).

Campo carta È la parte centrale della carta geologica, costituita dalla base topografica su cui sono riportate con colori differenti le varie formazioni geologiche. I limiti tra le varie formazioni, cioè le linee che in carta dividono aree di colore differente, sono detti *contatti geologici*. I contatti geologici possono essere di origine primaria (contatti stratigrafici, discordanze, intrusioni, ecc.) oppure di origine tettonica (faglie, sovrascorrimenti, ecc.).

Titolo Di solito riporta il tipo di carta (es. carta geologica, carta geologico-strutturale, ecc.) e l'area interessata (es. Carta geologica dell'Appennino settentrionale, Carta geologica d'Italia - Foglio 549 Muravera, ecc.).

Scala La scala della carta viene rappresentata da una scala grafica, con indicazione della scala e dell'equidistanza delle curve di livello della topografia.

Legenda Riporta tutte le unità litostratigrafiche (formazioni, depositi quaternari, ecc.) presenti nella carta geologica. Per ogni unità litostratigrafica è presente una casella con l'indicazione del colore e della sigla con cui l'unità litostratigrafica è rappresentata nella carta. Le unità litostratigrafiche sono riportate dalla più recente alla più antica, dall'alto verso il basso, è indicato il loro nome e sono accompagnate da una breve descrizione litologica, con indicazione dell'età. In aree deformate le formazioni sono solitamente raggruppate in unità tettoniche, in legenda vengono riportate prima le unità tettoniche che

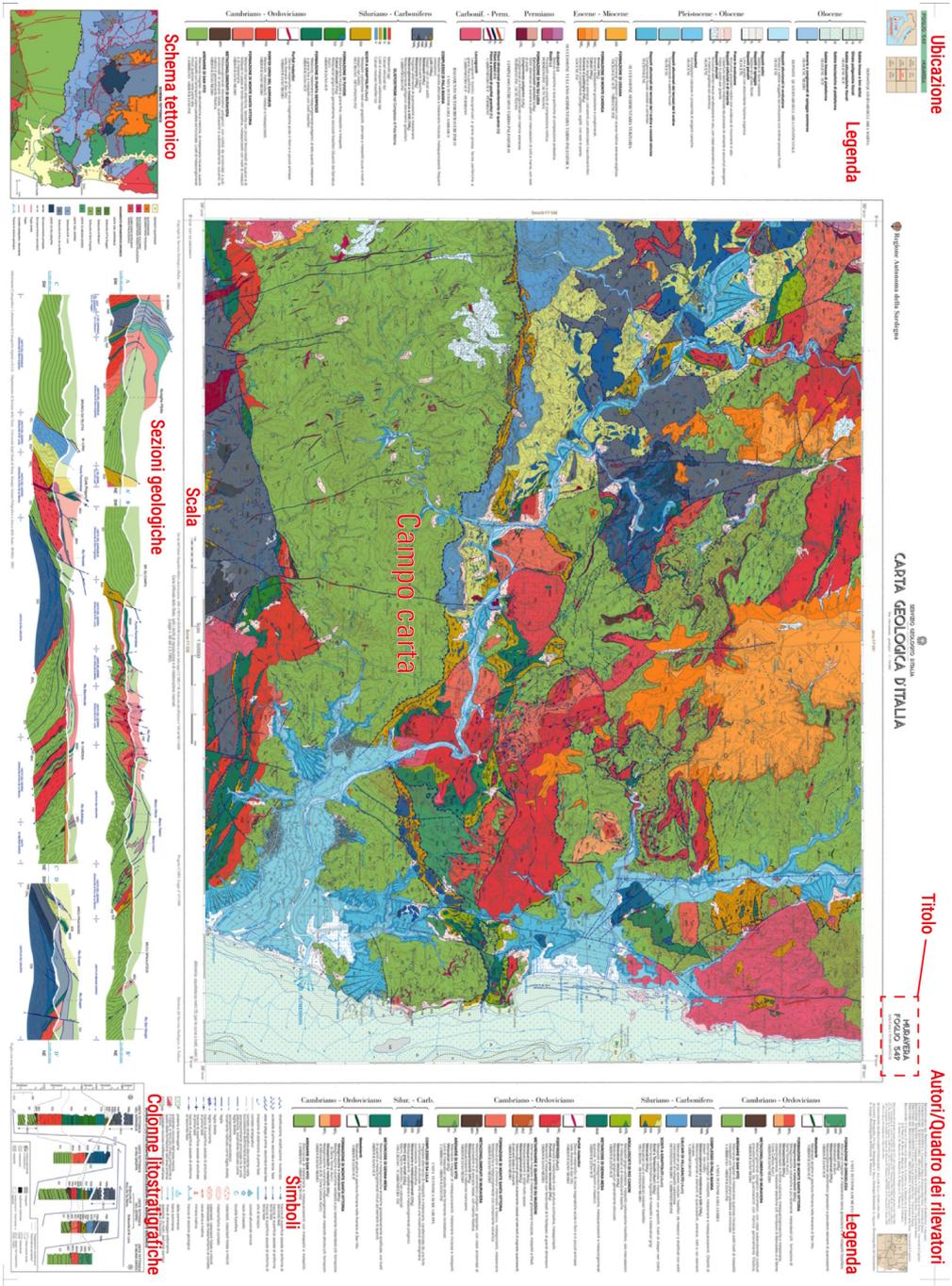


Figura 1.1 Carta geologica con indicate le varie parti che la compongono (Carta Geologica d'Italia, Foglio 549 - Muravera, https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/549_MURAVERA/Foglio.html).

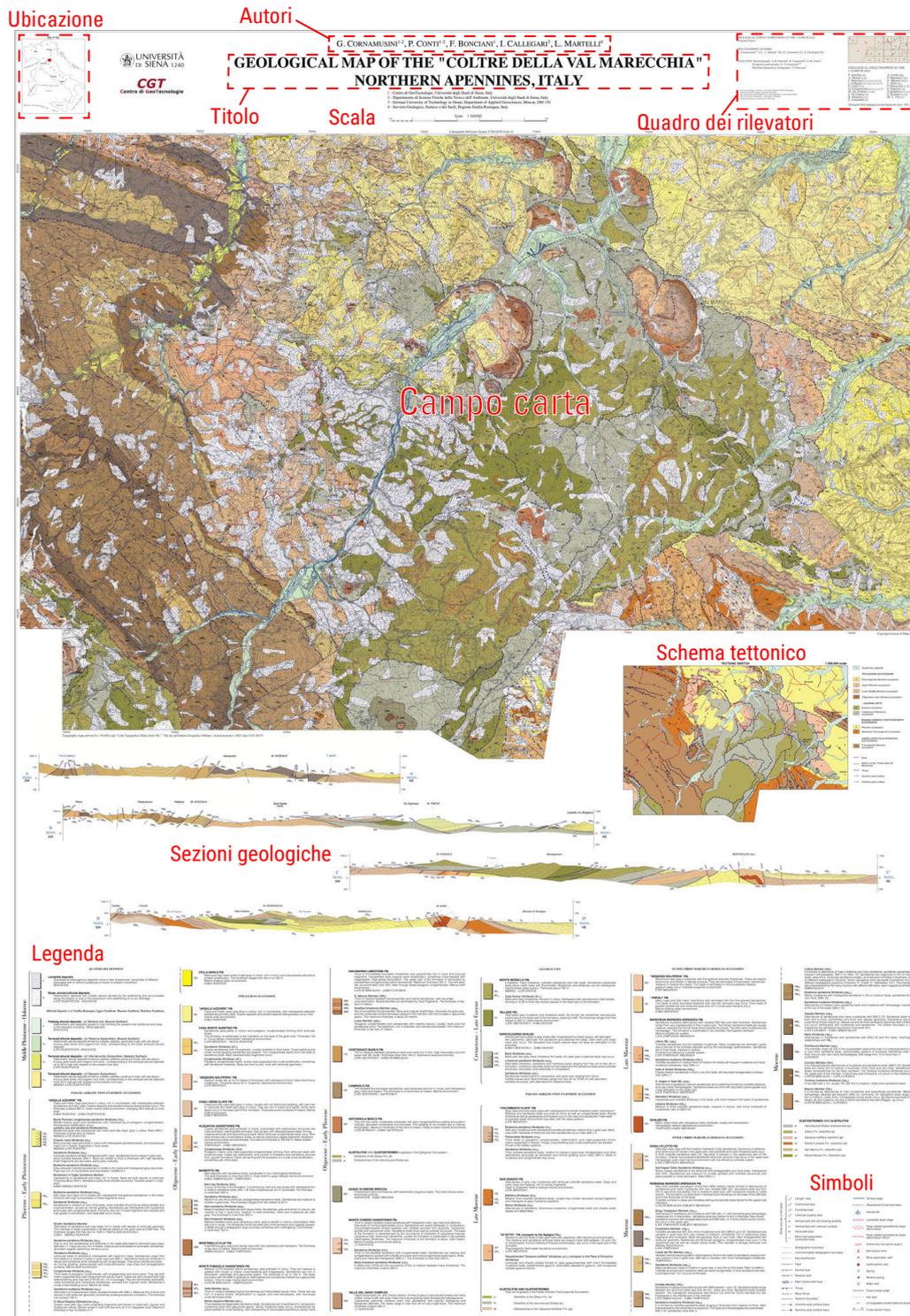


Figura 1.2 Carta geologica con indicate le varie parti che la compongono (Carta Geologica della Val Marecchia: <https://www.pconti.net/doc/CornamusiniMarecchia-Map.pdf>).

si trovano in alto nell'edificio strutturale, mentre successivamente vengono riportate le unità tettoniche più profonde.

Nella legenda e nelle sezioni geologiche le varie unità litostratigrafiche (formazioni, depositi quaternari, complessi metamorfici, ecc.) sono riportate con colori differenti. E' entrato nell'uso comune utilizzare alcuni colori per formazioni di età definite, come riportato in Fig. 1.3. Questi colori sono stabiliti soprattutto per le formazioni del Mesozoico e del Terziario e solitamente vengono usate varie tonalità del viola-rosa per formazioni triassiche, celeste per il Giurassico, verde per il Cretacico, marrone per il Paleogene e giallo per il Neogene. I depositi quaternari sono solitamente riportati in tonalità azzurro chiaro.

Simboli Devono essere riportati tutti i simboli usati nella carta. Sono i simboli con cui si indicano informazioni puntuali come le misure di stratificazione, di foliazioni, fluidalità magmatica, di assi di pieghe, località fossilifere, ecc.. Devono essere indicati i simboli lineari usati per i contatti stratigrafici, le faglie, i sovrascorrimenti, piani assiali, ecc. e quelli areali per l'indicazione di zone di taglio duttili o cataclastiche, aree interessate da metamorfismo di contatto, ecc. . Vengono qui rappresentati anche i simboli con cui si indicano località fossilifere, sorgenti, cave o miniere, discariche. I più comuni segni convenzionali sono riportati in Fig. 1.4.

Quadro dei rilevatori Vengono riportati i nomi dei geologi che hanno realizzato la carta, riporta le aree da loro rilevate, con indicazione del periodo in cui è stato effettuato il lavoro sul terreno. Si indica la loro affiliazione, cioè l'ente di appartenenza. In alcuni casi si indica i nomi delle persone che hanno effettuato attività di coordinamento o controllo.

Sezioni geologiche Le strutture presenti in una carta geologica sono comunemente rappresentate mediante sezioni geologiche. Una *sezione geologica* è una rappresentazione delle strutture geologiche del sottosuolo su di un piano verticale. Una o più sezioni geologiche sono utili per illustrare l'assetto geologico dell'area, nel campo carta devono essere riportate le tracce delle sezioni. La Fig. 1.5 riporta i più comuni figurati usati per rappresentare varie litologie nelle sezioni geologiche.

Schema tettonico Uno schema tettonico ha il compito di rappresentare le principali strutture geologiche e tettoniche presenti in carta in un contesto più ampio, ed è ad una scala molto minore di quella della carta. È molto importante perché rappresenta un fondamentale aiuto per la lettura della carta geologica, in quanto permette una rapida valutazione dei rapporti strutturali tra le varie unità tettoniche.

Colonne litostratigrafiche Le formazioni geologiche riportate in carta sono rappresentate anche come colonne litostratigrafiche con indicazione della litologia e degli spessori. Solitamente si riportano varie colonne per rappresentare le successioni stratigrafiche in differenti aree della carta o in differenti unità tettoniche, correlandole tra loro.

1.2 Tipi di superfici geologiche

In una carta geologica sono rappresentate varie formazioni geologiche, separate tra loro da vari tipi di superfici, queste superfici possono essere di *origine primaria* o di *origine tettonica*.

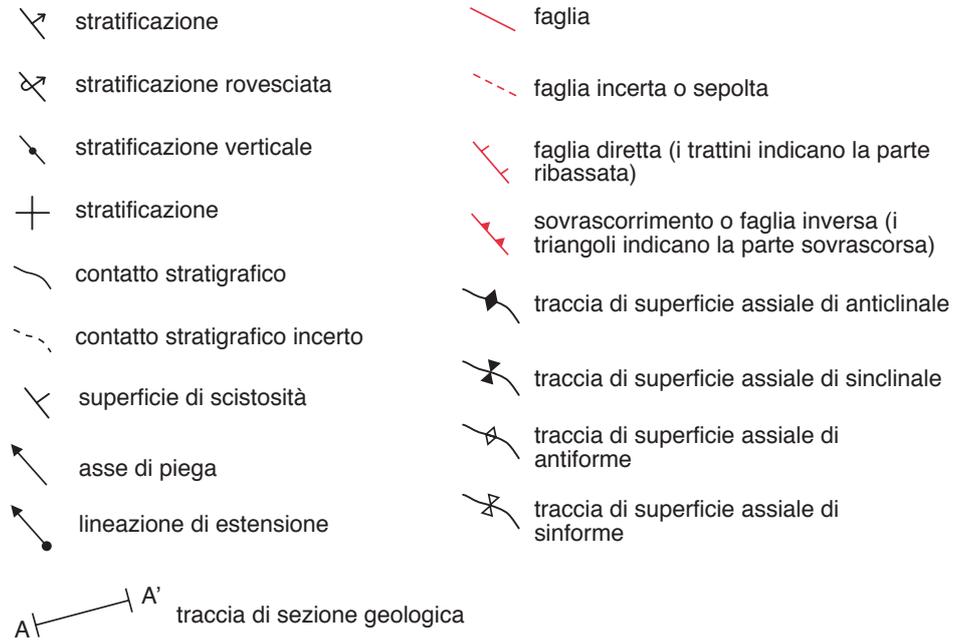


Figura 1.4 Segni convenzionali in una carta geologica. Solitamente i contatti tettonici (faglie, sovrascorrimenti) sono riportati con il colore rosso.

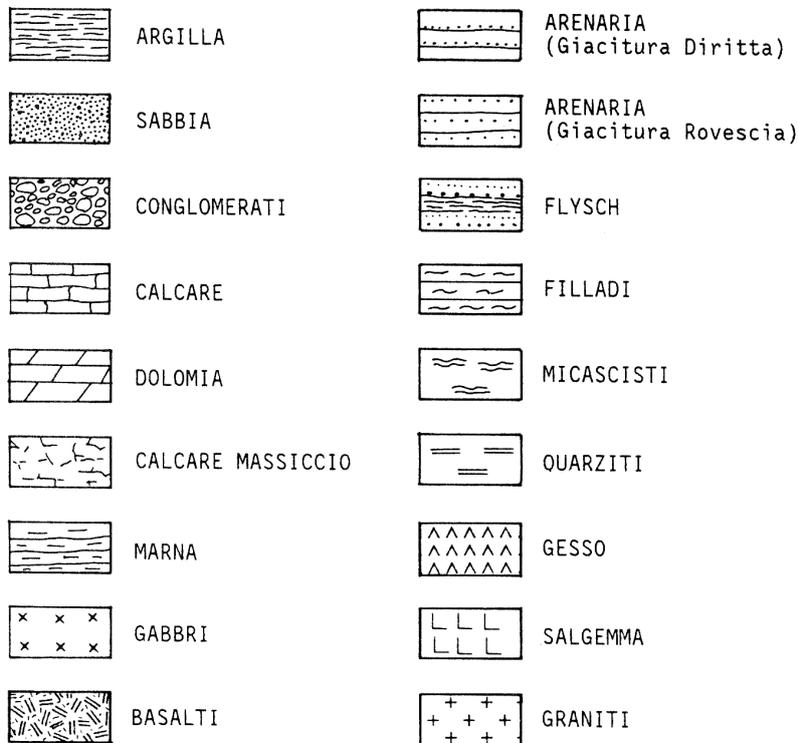


Figura 1.5 Figurati per rappresentare varie litologie nelle sezioni geologiche.

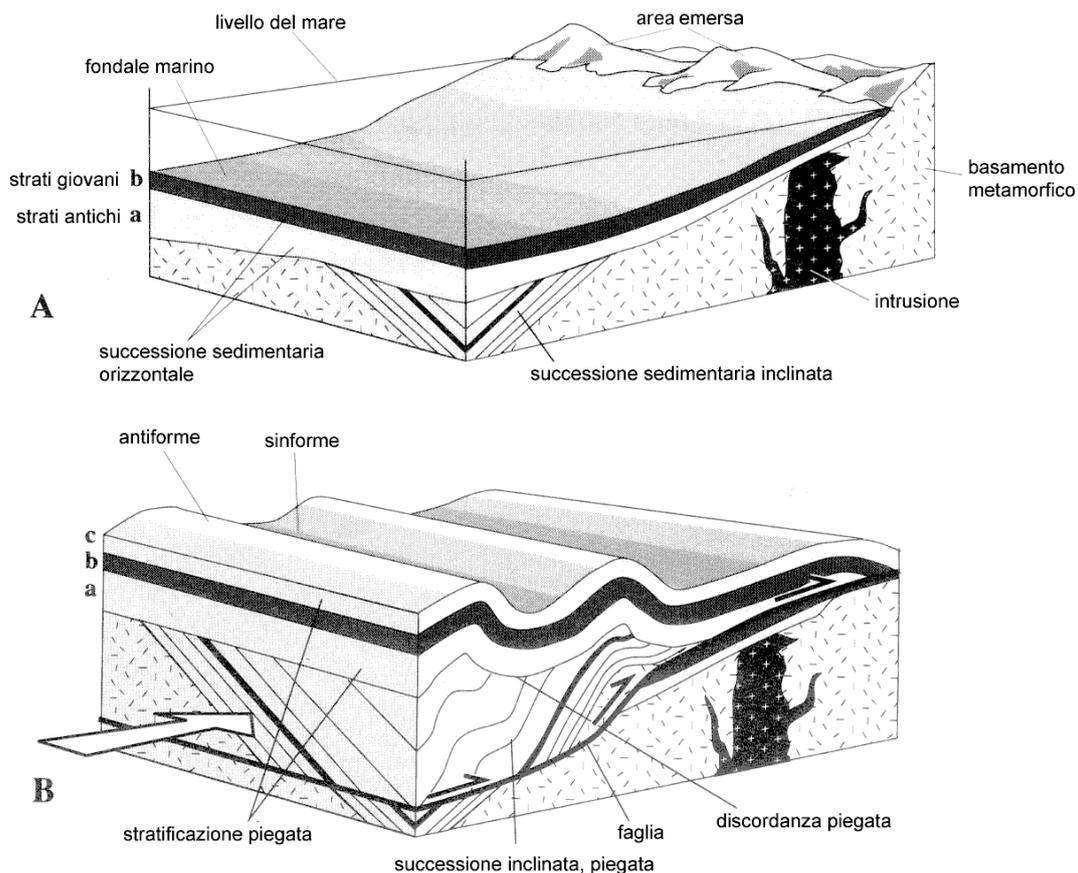


Figura 1.6 (a) Rappresentazione schematica di contatti stratigrafici, discordanze e contatti di rocce intrusive. (b) Rappresentazione schematica di superfici di origine tettonica.

Le superfici geologiche di origine primaria sono quelle che si sviluppano in un corpo roccioso durante la sua formazione. Rientrano in questo gruppo superfici legate a:

- processi di sedimentazione (contatti stratigrafici, stratificazione, discordanze, ecc.);
- messa in posto di rocce intrusive (contatti tra corpi plutonici, contatti tra graniti, filoni e rocce incassanti, ecc.);
- messa in posto di rocce effusive (contatti tra vari tipi di lave, contatti tra corpi di colate piroclastiche, stratificazione in depositi di caduta pliniani, ecc.).

La Fig. 1.6a illustra alcune superfici di origine primaria.

Le superfici di origine tettonica si sviluppano invece in una roccia successivamente alla sua formazione a seguito di processi deformativi e metamorfici. Rientrano in questo gruppo superfici quali foliazioni, sovrascorrimenti, faglie, giunti di fratturazione, ecc. (Fig. 1.6b).

Tutte le superfici geologiche, primarie e tettoniche, avranno rappresentazioni diverse nelle carte geologiche e ciò dipenderà da vari fattori, quali la forma vera e propria della superficie geologica, la sua orientazione nello spazio, la forma del terreno (andamento della topografia). È l'interpretazione dell'andamento tridimensionale delle superfici presenti in una carta geologica che permette la realizzazione di sezioni geologiche e la corretta interpretazione dell'evoluzione geologica dell'area.

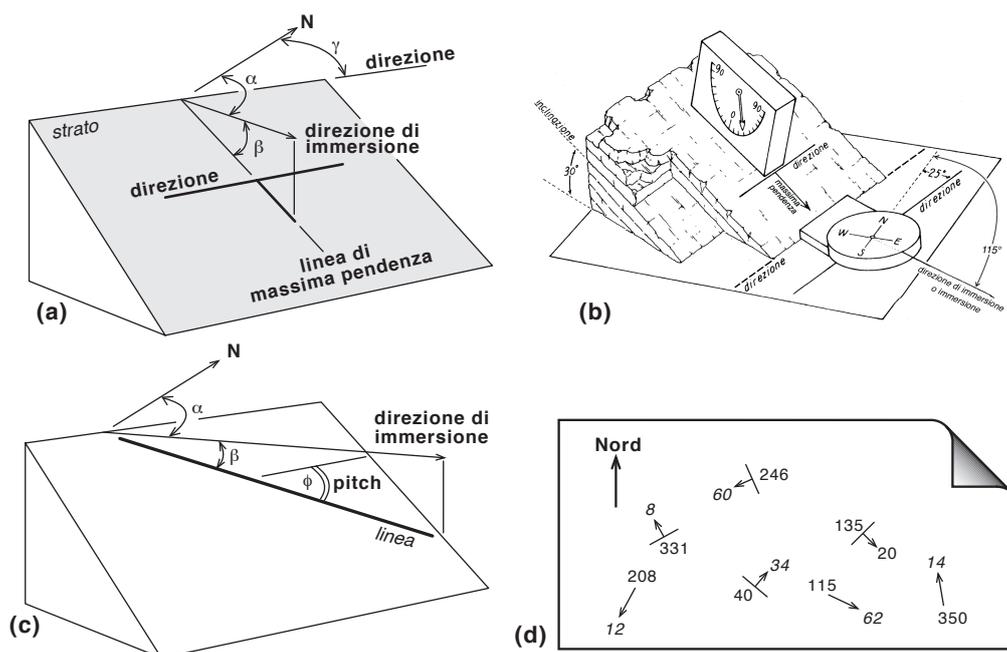


Figura 1.7 (a) Definizione di direzione (γ), direzione di immersione (α) e inclinazione (β) di uno strato (in grigio). (b) Misura in affioramento. (c) Definizione di direzione di immersione (α), inclinazione (β) e pitch (ϕ) di una linea. (d) Rappresentazione di giaciture di stratificazione e di assi in una carta geologica, in corsivo sono i valori di inclinazione.

1.3 Misure

L'orientazione (o giacitura) di una struttura geologica planare (es. stratificazione, foliazione, ecc.) o lineare (es. flute cast, asse di piega, strie di faglia, ecc.) può essere indicata in una carta geologica mediante una *misura*. Vediamo come si rappresentano le misure, ricordando che in geologia i termini “direzione”, “direzione di immersione”, “linea di massima pendenza” e “inclinazione” non sono sinonimi e hanno significato ben preciso.

Alcune definizioni per strutture geologiche planari (Fig. 1.7):

- l'intersezione tra una superficie geologica inclinata (es. uno strato, una foliazione, una faglia, ecc.) e un piano orizzontale definisce una linea, questa linea è la *direzione* (ingl. *strike*) di tale superficie geologica; la direzione è l'unica linea orizzontale esistente sulla superficie geologica e varia tra 0° e 180° , potendo essere misurata sia in senso orario sia in senso antiorario;
- la linea che giace su una superficie geologica e che è ortogonale alla direzione è detta *linea di massima pendenza* del piano;
- la *direzione di immersione* o *immersione* di un piano è l'angolo, misurato in senso orario, tra il Nord geografico e la proiezione della linea di massima pendenza su di un piano orizzontale; questo angolo è indicato con α in Fig. 1.7a e varia da 0° a 360° ;
- l'*inclinazione* di un piano è l'angolo che la linea di massima pendenza fa con l'orizzontale e varia tra 0° e 90° (angolo β in Fig. 1.7a).

Un piano quindi può essere sempre indicato da una coppia di valori angolari, di cui il primo è la direzione di immersione e il secondo l'inclinazione (es. 78/25, 125/34, 247/68, 355/8)¹.

¹Questa è la convenzione usata in queste dispense, ma esistono molte altre notazioni per indicare la giacitura

2

Forma degli affioramenti

In questo Capitolo saranno illustrati i rapporti tra andamento dei contatti e topografia. Per fare questo sono utilizzati semplici modelli tridimensionali che permettono di visualizzare varie strutture geologiche e la loro intersezione con la topografia. Questi modelli sono stati creati usando l'applicazione online Visible Geology (<https://app.visiblegeology.com>). In questi modelli (come es. in Fig. 2.2) sono riportate visualizzazioni tridimensionali con semplici topografie, solitamente una valle rettilinea (Fig. 2.2a) o un rilievo regolare (Fig. 2.2b) e relative carte geologiche (cioè vista dall'alto dei modelli tridimensionali, Fig. 2.2c,d). Ove possibile sono stati riportati anche esempi da carte geologiche pubblicate.

2.1 Contatti geologici e topografia

Per interpretare le strutture presenti in una carta geologica è necessario conoscere l'orientazione (direzione, direzione di immersione, inclinazione) dei contatti stratigrafici e tettonici in essa riportati. Questo è facilitato dalla presenza di misure nella carta, ma nella maggior parte dei casi l'assenza di misure implica che la giacitura dei contatti deve essere stabilita durante la lettura della carta dal loro andamento in carta. È quindi di fondamentale importanza riconoscere direzione di immersione e inclinazione di uno strato dalla semplice analisi della carta geologica, basandosi sull'intersezione dello strato con la superficie topografica.

La giacitura di strati, o superfici planari in genere, rispetto al versante rientra in uno dei seguenti casi (Fig. 2.1):

- a) strati orizzontali;
- b) strati verticali;
- c) strati inclinati a reggipoggio;
- d) strati inclinati a franapoggio, con inclinazione maggiore dell'inclinazione del versante;
- e) strati inclinati a franapoggio, con inclinazione minore dell'inclinazione del versante.

2.1.1 Strati orizzontali

L'intersezione di uno strato orizzontale con una qualsiasi superficie topografica genera contatti sempre paralleli alle isoipse della carta topografica (Fig. 2.2).

Nel caso di una valle rettilinea (Fig. 2.2a,c) i contatti avranno anch'essi un andamento rettilineo, parallelo alle isoipse. Nel caso di un rilievo regolare le isoipse avranno un

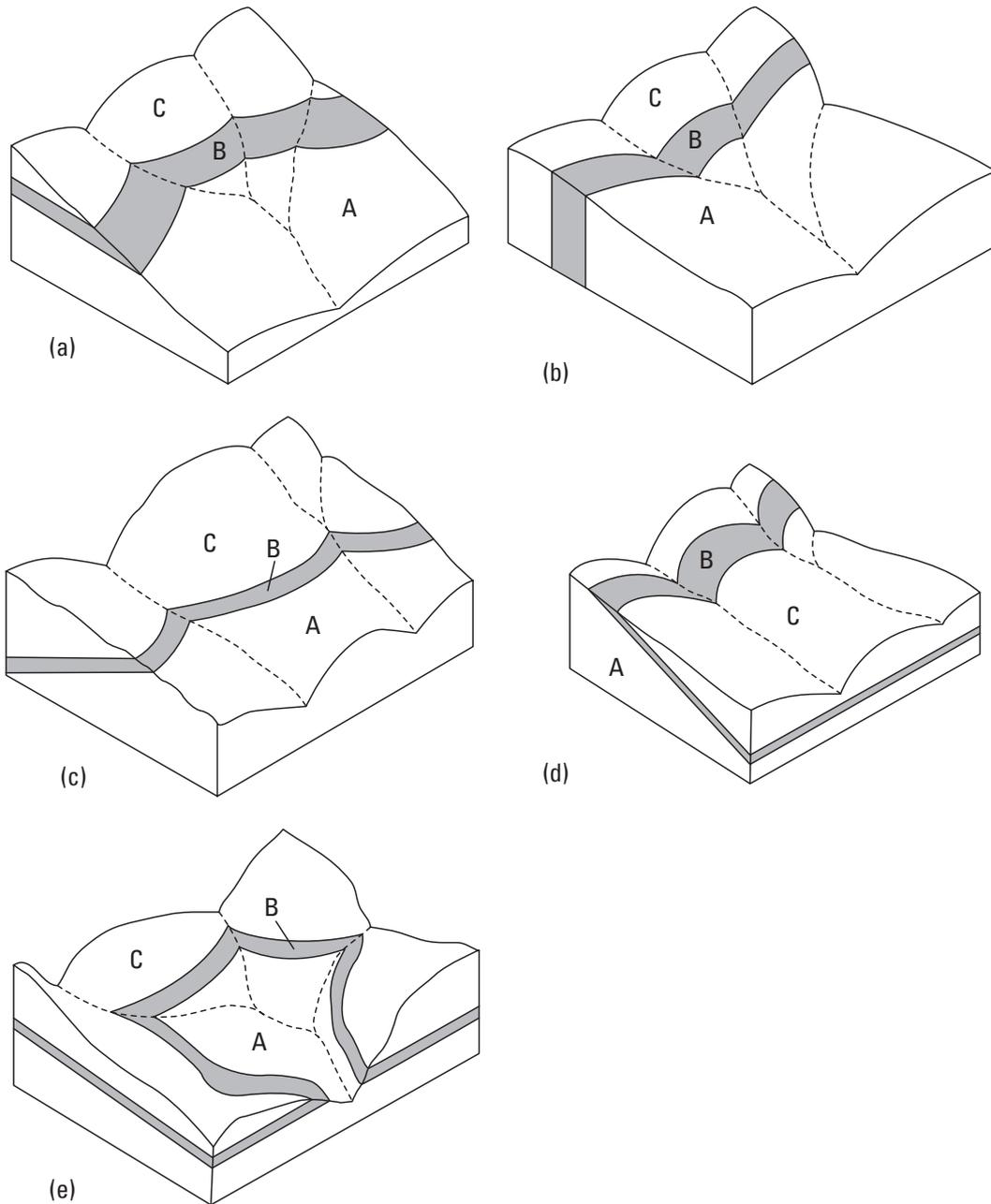


Figura 2.1 Possibili rapporti tra giacitura dei contatti e topografia. (a) strati orizzontali. (b) Strati verticali. (c) Strati inclinati a reggipoggio. (d) Strati inclinati a franapoggio, con inclinazione maggiore dell'inclinazione del versante. (e) Strati inclinati a franapoggio, con inclinazione minore dell'inclinazione del versante.

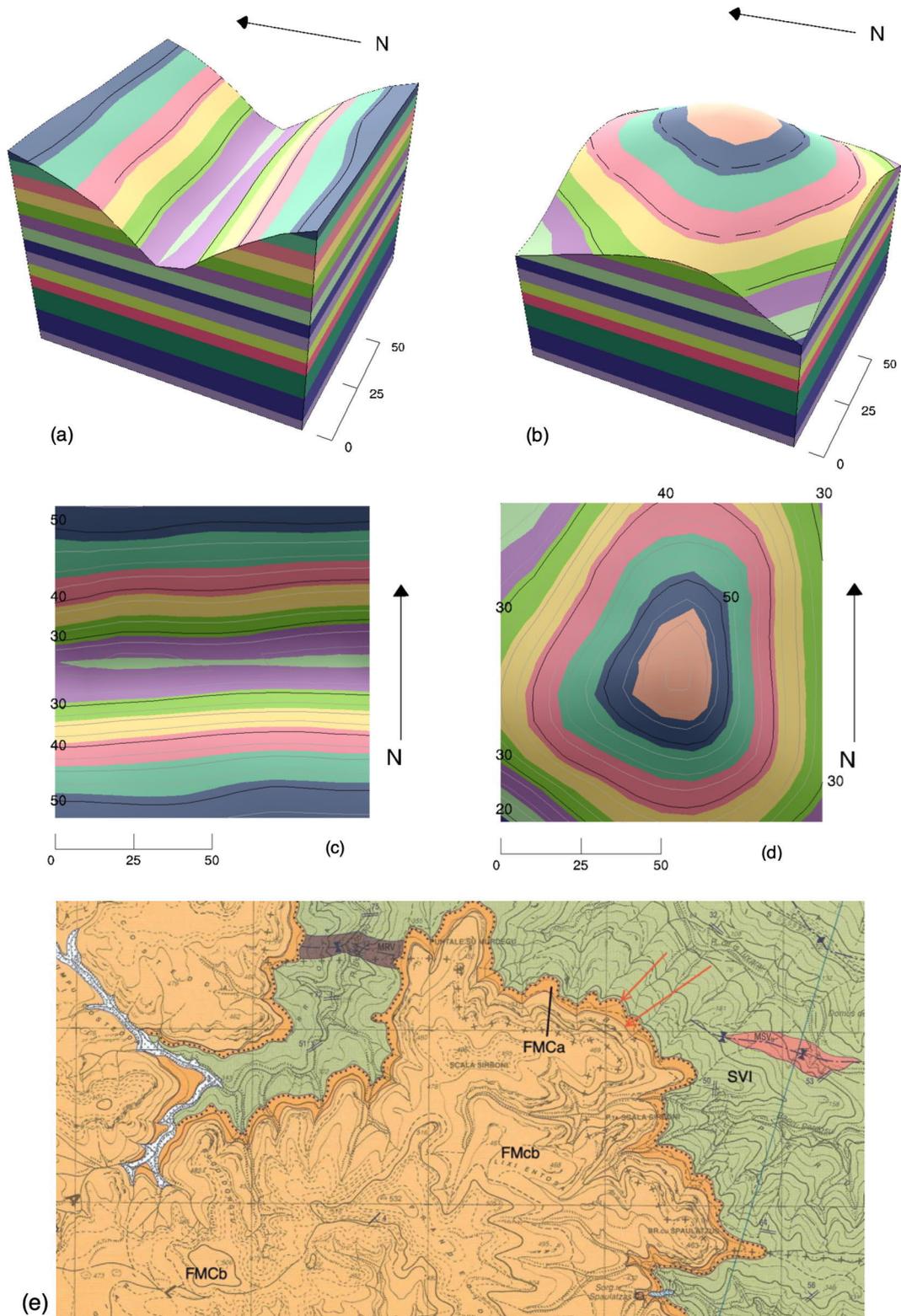


Figura 2.2 (a) Modello tridimensionale di strati orizzontali nel caso di una morfologia con una valle rettilinea. (b) Modello tridimensionale di strati orizzontali nel caso di una morfologia con un rilievo. (c) e (d) Relative carte geologiche. (e) Andamento orizzontale di contatti (indicati dalle frecce rosse) in una carta geologica.

andamento concentrico e anche i contatti avranno il solito andamento (Fig. 2.2b,d). In entrambi i casi se notiamo le isoipse a cui è parallela la base e il tetto di una formazione, la differenza ci indica lo spessore reale della formazione.

La Fig. 2.2e mostra questo andamento dei contatti nel caso di una carta geologica reale. Il contatto alla base dell'unità litostratigrafica FMCa (con la formazione SVI) è orizzontale, come il contatto tra FMCb e FMCa. Questi contatti seguono le isoipse in tutta l'area.

2.1.2 Strati verticali

Nel caso di uno strato verticale i contatti sono rettilinei, indipendentemente dalla topografia dell'area (Fig. 2.3). La direzione dei contatti in carta ci fornisce la direzione (*strike*) dello strato.

Aree con la stratificazione verticale sono molto utili in quanto ci permettono di misurare facilmente lo spessore di una formazione. Dalla Fig. 2.3c,d è evidente come con qualsiasi topografia lo spessore delle formazioni geologiche in carta non cambia, e lo spessore che si può misurare nella carta geologica è il loro spessore reale.

Strati inclinati

Nel caso di strati inclinati, si possono avere i seguenti differenti casi di rapporti tra andamento dei contatti e andamento della topografia del versante (Fig. 2.4):

- strati a *reggipoggio*, quando stratificazione e versante immergono nella direzione opposta;
- strati a *franapoggio*, quando stratificazione e versante immergono nella stessa direzione. In aree con strati a franapoggio sono possibili due ulteriori casi:
 - strati a franapoggio *più inclinati del versante*;
 - strati a franapoggio *meno inclinati del versante*.

2.1.3 Strati inclinati a reggipoggio

Nel caso di strati inclinati l'andamento in carta dei contatti tra le formazioni non seguirà le isoipse (come nel caso di strati orizzontali) e non avranno un andamento rettilineo (come nel caso di strati inclinati), ma avranno un andamento più complicato che dipenderà dall'orientazione del contatto (direzione di immersione e inclinazione) e dall'andamento della topografia in quell'area.

Nel caso semplice (Fig. 2.5a,c) di contatti inclinati che attraversano una valle, i contatti tra le formazioni hanno una forma a "v" e la punta della "v" è diretta verso la formazione sovrastante (*detta anche regola della "v"*).

La Fig. 2.5b rappresenta il solito assetto geologico, cioè strati tutti immergenti verso Est, ma nel caso di un rilievo. Nell'area indicata con "A" in Fig. 2.5b, si hanno strati che immergono verso Est, mentre il pendio immerge verso Ovest, siamo cioè nel caso di strati con giacitura a reggipoggio. Strati inclinati a reggipoggio producono contatti con andamento sinuoso (non rettilineo) che in corrispondenza dei rilievi (o dossi) hanno una forma concava (Fig. 2.5d). In corrispondenza di questi dossi la concavità del contatto è rivolta verso la formazione sovrastante.

Nel caso della Fig. 2.5c la stratificazione immerge esattamente verso Est (90/50) e la "punta" del contatto è rivolta verso Est. Nel caso la giacitura della stratificazione non sia esattamente immergente verso Est, ma immerga comunque verso oriente (es. 110/50),

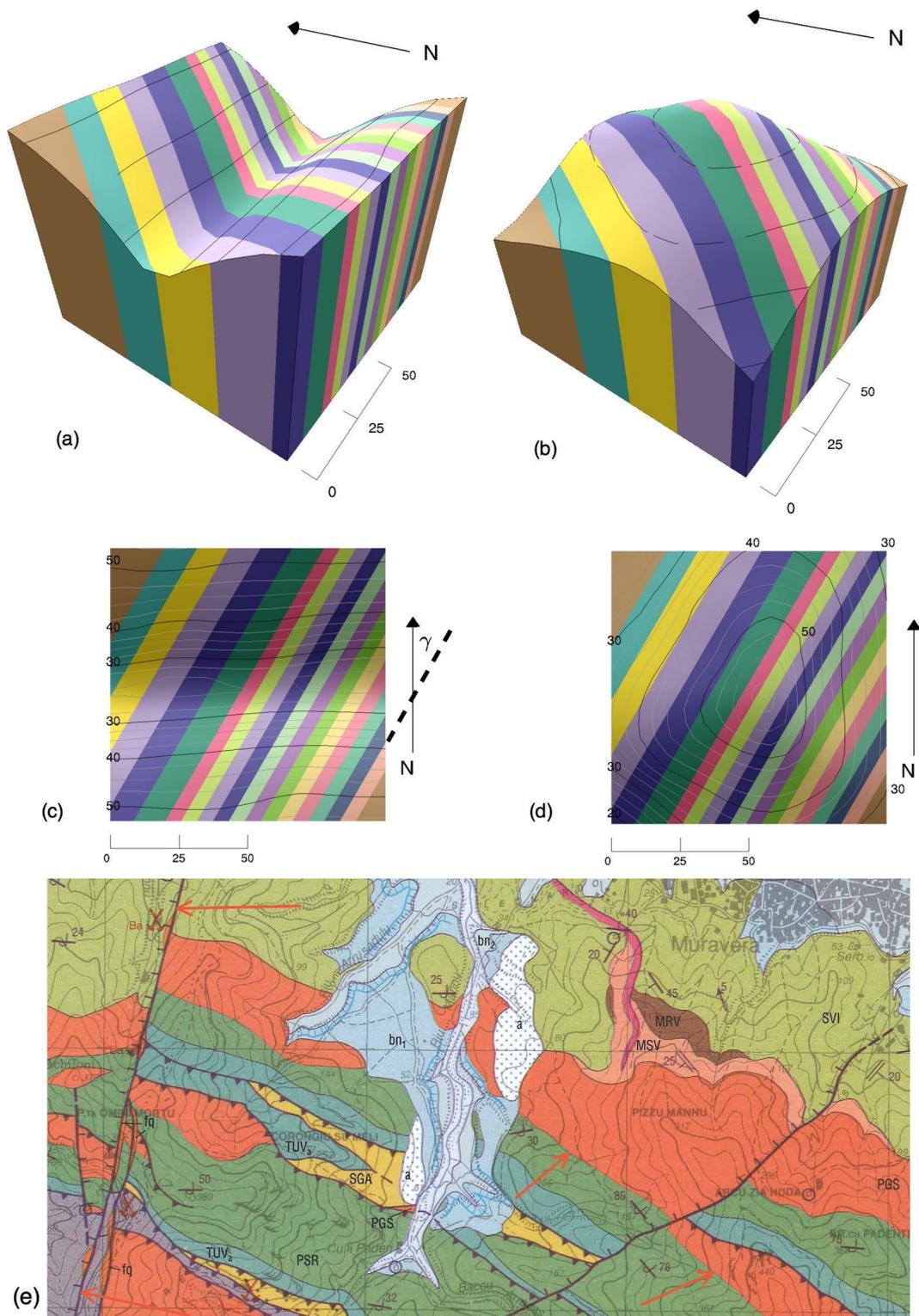


Figura 2.3 (a) Modello tridimensionale di strati verticali nel caso di una morfologia con una valle. (b) Modello tridimensionale di strati verticali nel caso di una morfologia con un rilievo. (c) e (d) Relative carte geologiche. L'angolo γ è la direzione della stratificazione. (e) Andamento verticale di contatti stratigrafici (indicati dalle frecce rosse) in una carta geologica. Anche la faglia nella parte occidentale della carta ha una giacitura verticale.

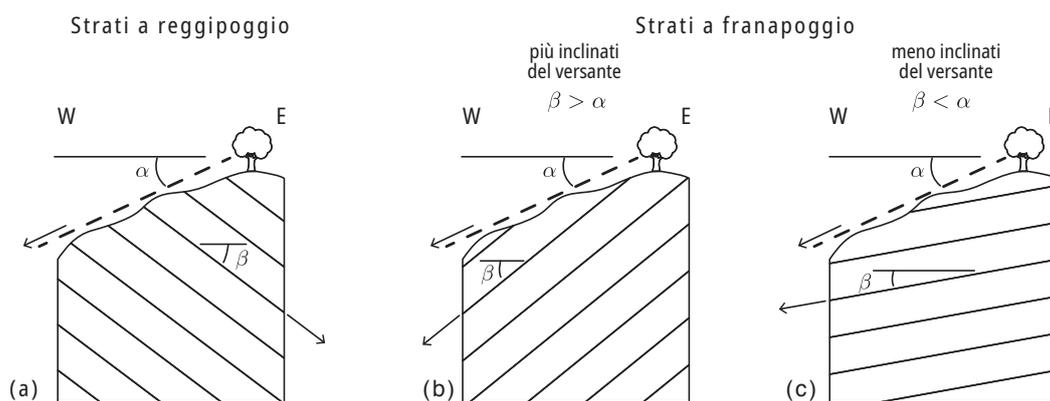


Figura 2.4 Possibili giaciture di strati inclinati rispetto ad un versante. La linea tratteggiata rappresenta l'inclinazione media del versante. L'inclinazione del versante è α , uguale nei tre casi, β è l'inclinazione della stratificazione. (a) Strati a reggipoggio: gli strati hanno una direzione di immersione (verso Est) opposta alla direzione di inclinazione del pendio (verso Ovest). (b) Strati a franapoggio più inclinati del versante: la stratificazione e il versante immergono nella solita direzione (verso W), ma l'inclinazione degli strati β è maggiore dell'inclinazione del versante α . (c) Strati a franapoggio meno inclinati del versante: la stratificazione e il versante immergono nella solita direzione (verso W), ma l'inclinazione degli strati β è minore dell'inclinazione del versante α .

la “punta” del contatto nella valle sarà sempre verso la formazione sovrastante, ma sarà differente l'andamento dei contatti nei due versanti della valle (Fig. 2.6).

È importante ricordare che in una certa area si hanno degli strati a reggipoggio (o a franapoggio) solo per particolari orientazioni del versante, e che la giacitura a reggipoggio (o a franapoggio) cambia se cambia l'orientazione del versante. Si consideri l'esempio della Fig. 2.7, in cui è rappresentata una valle con orientazione Est-Ovest (cioè i due versanti hanno inclinazione verso Sud e verso Nord, rispettivamente) e la stratificazione in tutta l'area immerge esattamente verso Sud ($180/20$). Nel versante “A” si ha un assetto con strati a reggipoggio, mentre nel versante “B” si hanno strati a franapoggio. Si noti inoltre che entrambi i versanti hanno una direzione (Est-Ovest) che coincide con la direzione della stratificazione, ciò implica che l'intersezione tra stratificazione e topografia produrrà in carta dei contatti orizzontali paralleli alle isoipse, cioè i contatti non attraverseranno la valle e non è possibile applicare la regola della “v” per stabilire i rapporti tra le varie formazioni. La situazione però è diversa rispetto a quanto visto nel caso di stratificazione orizzontale, nel caso della Fig. 2.7b l'estensione delle formazioni in carta è differente sui due versanti (la solita formazione ha un'ampia estensione di affioramento nell'area a franapoggio C e un'estensione molto minore nell'area reggipoggio C'), il che non accade nel caso di contatti orizzontali.

2.1.4 Strati inclinati a franapoggio con inclinazione maggiore del versante

Nel caso di strati inclinati con direzione di immersione concordante con quella del versante (strati a franapoggio) e inclinazione maggiore dell'inclinazione del versante (Fig. 2.4b) producono contatti con andamento sinuoso che in corrispondenza delle valli hanno una forma a “v” e in corrispondenza dei dossi una forma concava, analogamente a quanto visto per gli strati a reggipoggio. Nelle valli come al solito la punta della “v” è diretta verso la formazione sovrastante, e anche in corrispondenza dei dossi la concavità è rivolta verso la formazione sovrastante. Questa geometria è riportata in Fig. 2.8a,c,e.

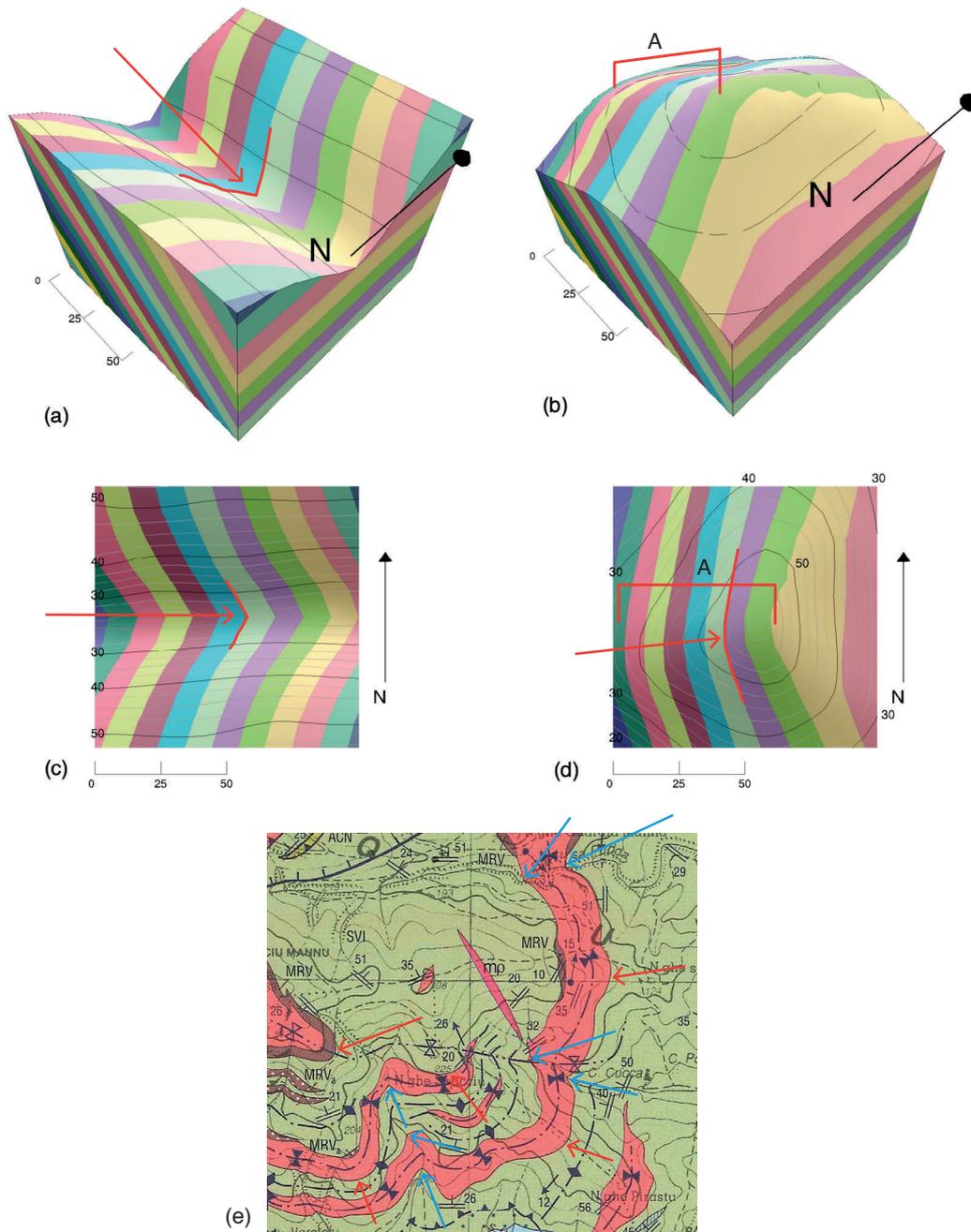


Figura 2.5 Modelli tridimensionali e carte geologiche nel caso di strati inclinati, gli strati hanno tutti giacitura 90/50 (direzione di immersione verso Est). (a) Valle con andamento Est-Ovest con strati inclinati, la linea rossa indica la forma a "v" dei contatti nel punto in cui attraversano la valle. Tutti i contatti immergono verso Est. (b) Modello tridimensionale di strati a reggipoggio. Nell'area "A" gli strati hanno un'immersione verso Est opposta all'inclinazione del versante (verso Ovest). (c) Carta geologica relativo al modello tridimensionale in (b). (d) Carta geologica di un rilievo con strati a reggipoggio. La linea rossa indica l'andamento concavo dei contatti e la concavità (indicata dalla freccia) è rivolta verso Est, cioè verso le formazioni sovrastanti. (e) Carta geologica con contatti generalmente a reggipoggio; le frecce rosse indicano punti in corrispondenza di dossi in cui la concavità dei contatti (verso W e NW) è diretta verso le formazioni sovrastanti; le frecce blu indicano punti in corrispondenza di valli, in cui la punta a "v" del contatto è diretta verso le formazioni sovrastanti.

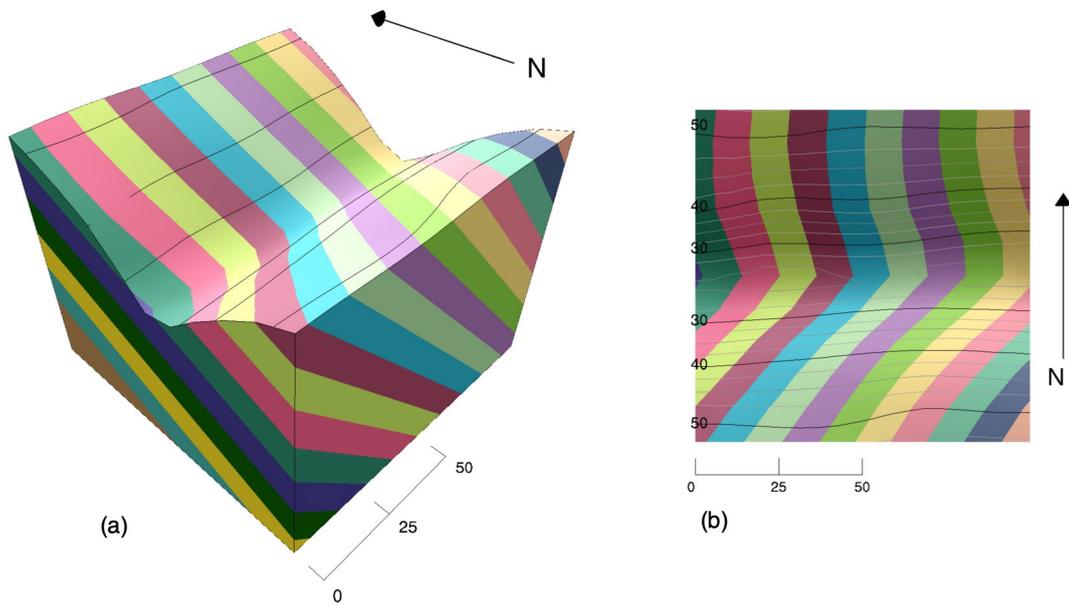


Figura 2.6 Andamento di contatti inclinati nel caso di una valle con andamento Est-Ovest, la giacitura della stratificazione è 110/50.

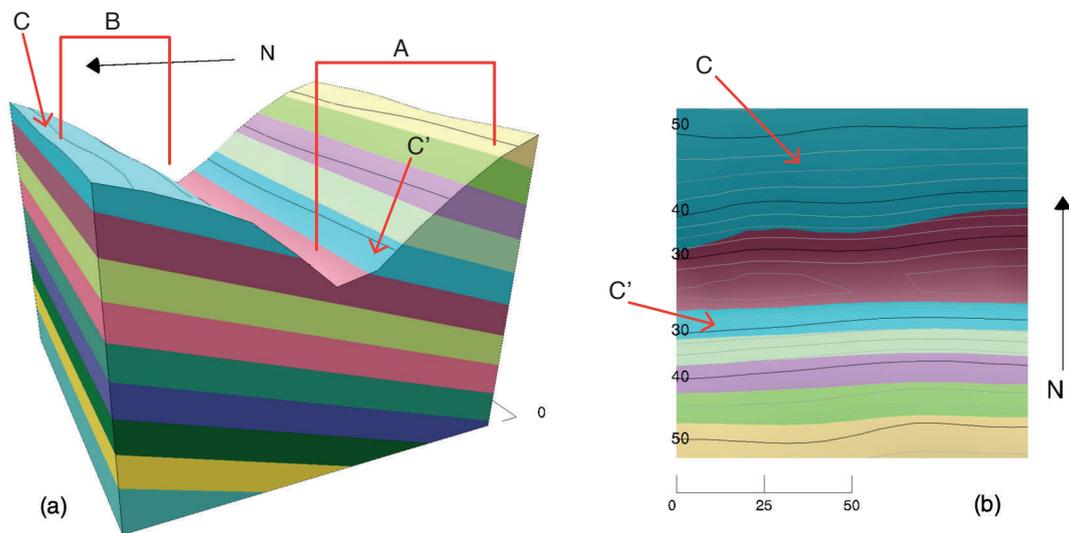


Figura 2.7 (a) Modello tridimensionale e (b) Carta geologica in un'area in cui la stratificazione (giacitura 180/20) ha la stessa direzione dei versanti.

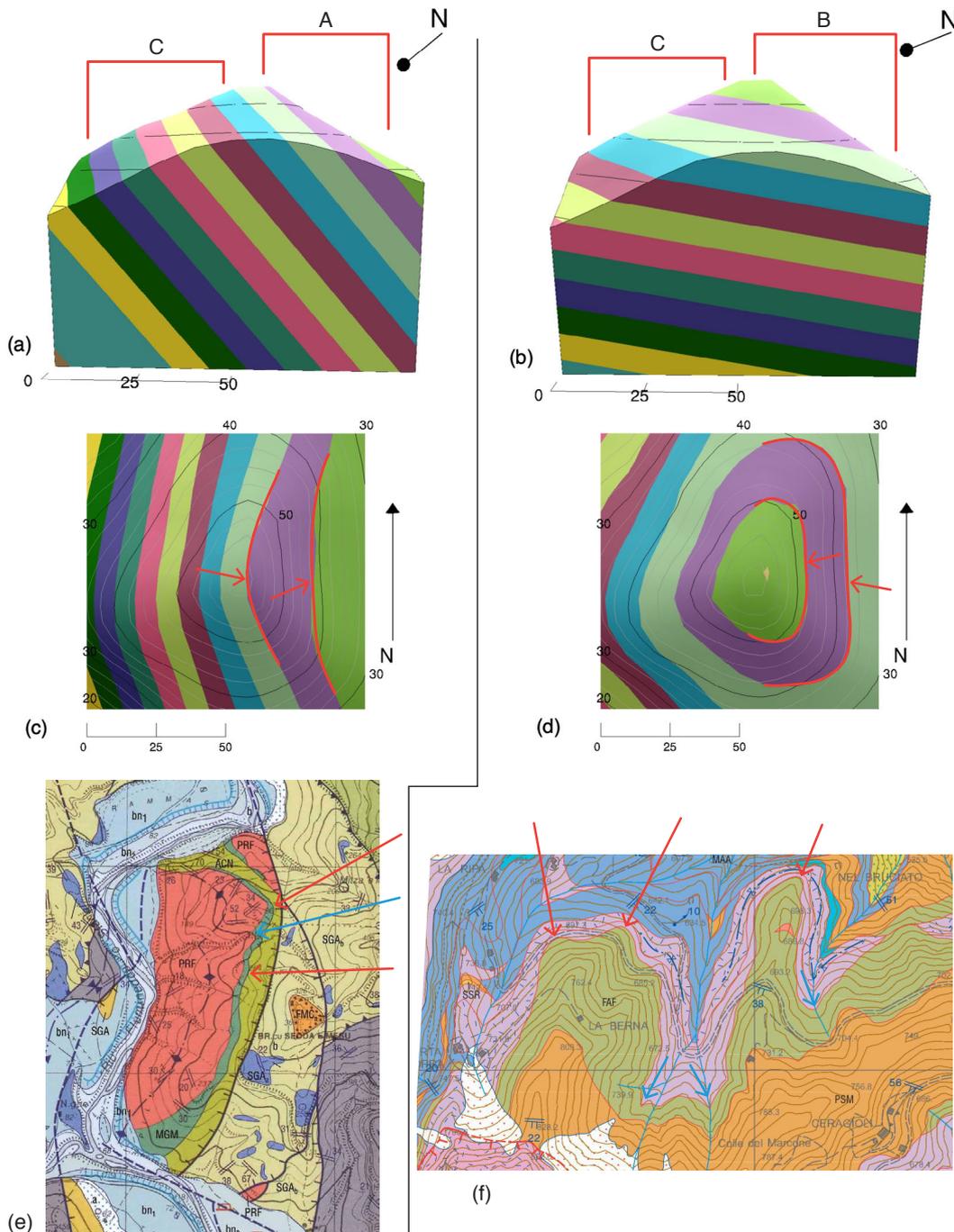


Figura 2.8 (a) Modello di un'area con strati a reggipoggio più inclinati del pendio (area "A"), in "C" gli strati sono a reggipoggio, la stratificazione ha giacitura 90/50. (b) Modello di un'area con strati a reggipoggio meno inclinati del pendio (area "B"), in "C" gli strati sono a reggipoggio, la stratificazione ha giacitura 90/20. (c) Carta geologica del modello in (a), la concavità dei contatti (evidenziata dalle frecce rosse) è rivolta verso Est, verso la formazione sovrastante. (e) Carta geologica di un'area con contatti franapoggio più inclinati del pendio immergenti verso Ovest, si noti l'andamento in corrispondenza di dossi (frecce rosse) e di valli (freccia blu). (f) Carta geologica di un'area con contatti franapoggio meno inclinati del pendio immergenti verso Nord, si noti l'andamento in corrispondenza di dossi (frecce rosse) e di valli (frecce blu).

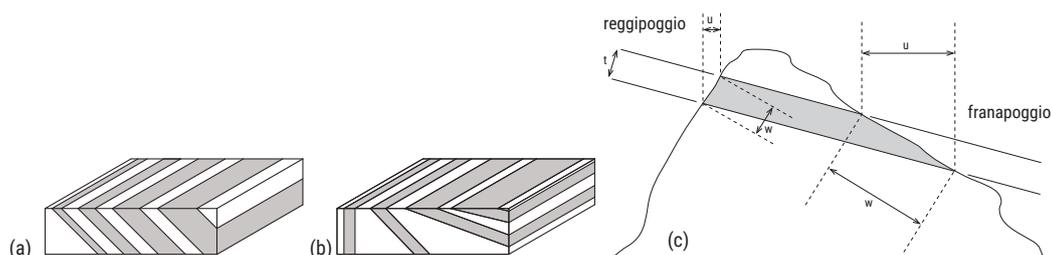


Figura 2.9 Estensione affioramenti, spessore e inclinazione degli strati, topografia. (a) Nel caso di strati con inclinazione costante, l'ampiezza dell'affioramento nella carta geologica riflette solamente lo spessore dello strato (spessori maggiori corrispondono a strati più spessi). (b) Nel caso di strati con spessore uguale ma inclinazione variabile, l'ampiezza degli affioramenti nella carta geologica riflette l'inclinazione dello strato (inclinazioni minori degli strati producono affioramenti di estensioni maggiori). (c) Sezione in un rilievo in cui è presente uno strato che affiora su i due versanti. w è l'ampiezza dell'affioramento sul terreno, u è l'ampiezza dell'affioramento misurata sulla carta geologica, t è lo spessore reale dello strato.

2.1.5 Strati inclinati a franapoggio con inclinazione minore del versante

Nel caso di strati inclinati con direzione di immersione concordante con quella del versante (strati a franapoggio) e inclinazione minore dell'inclinazione del versante (Fig. 2.4c) producono contatti con andamento sinuoso che in corrispondenza delle valli hanno una forma a "v" e in corrispondenza dei dossi una forma concava. Nelle valli come al solito la punta della "v" è diretta verso la formazione sovrastante, e anche in corrispondenza dei dossi la concavità è rivolta verso la formazione sovrastante. Questa geometria è riportata in Fig. 2.8b,d,f.

In carta per poter distinguere questo caso dalla situazione con strati a franapoggio più inclinati del pendio, è utile confrontare l'andamento dei contatti nell'area "A" in Fig. 2.8c e nell'area "B" in Fig. 2.8d. In Fig. 2.8c i contatti hanno una concavità rivolta verso Est e dai punti di maggior concavità (indicati dalle frecce) i contatti tagliano le isoipse scendendo di quota andando verso Est. Nel caso della Fig. 2.8c i contatti hanno una concavità rivolta verso Ovest e dai punti di maggior concavità (indicati dalle frecce) i contatti tagliano le isoipse aumentando di quota andando verso Ovest. Questo differente andamento dei contatti rispetto alle isoipse ci permette di stabilire, dalla semplice analisi dell'andamento dei contatti rispetto alle isoipse, se siamo nel caso di contatti a franapoggio più inclinati del pendio, oppure meno inclinati del pendio.

2.2 Estensione degli affioramenti e stratimetria

L'intersezione di uno strato con la superficie topografica determina la forma di affioramento di questo strato sulla carta geologica. La forma dell'affioramento dipenderà dallo spessore dello strato, dall'orientazione dello strato (immersione e inclinazione) e dalla forma e orientazione della superficie topografica. In una carta geologica con una semplice topografia circa orizzontale si vede come per strati di inclinazione costante l'ampiezza dell'affioramento in carta aumenta con l'aumentare dello spessore dello strato (Fig. 2.9a); un aumento in carta dell'ampiezza dell'affioramento può essere prodotto anche da una diminuzione dell'inclinazione degli strati (Fig. 2.9b), anche se il loro spessore rimane costante. Nel caso di strati verticali lo spessore misurato in carta è uguale allo spessore reale.

Nel caso di aree con topografia non orizzontale, ma caratterizzate da rilievi (Fig. 2.9c), si hanno generalmente estensioni degli affioramenti più limitate quando si hanno strati

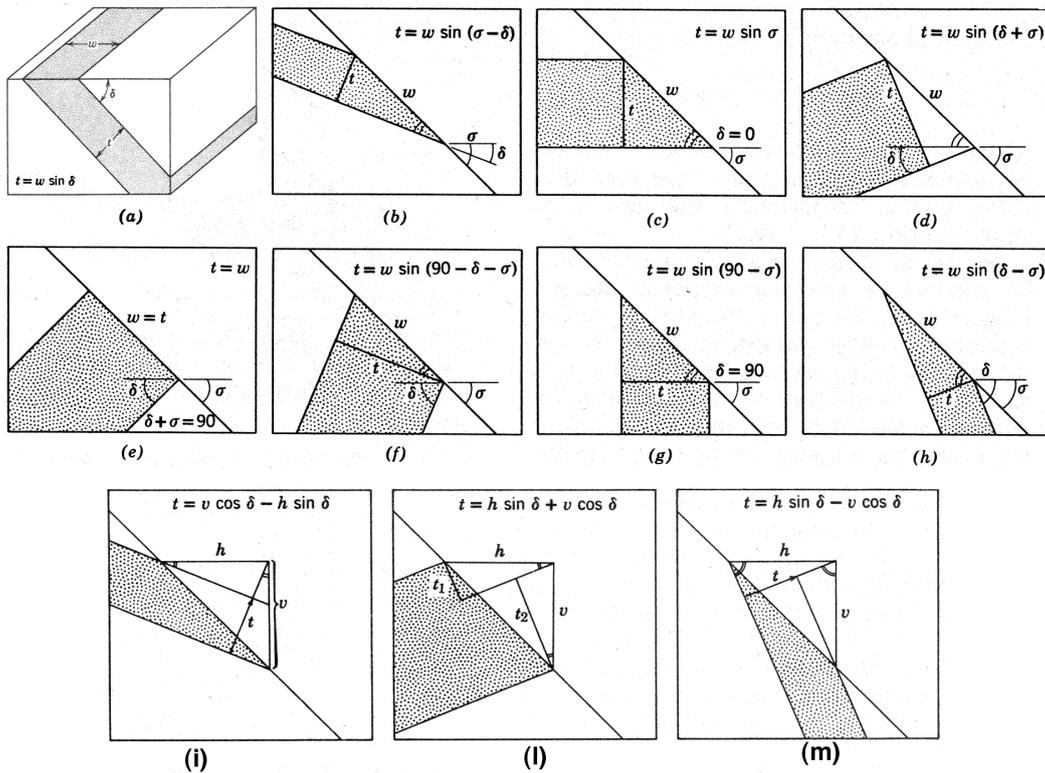


Figura 2.10 Misura dello spessore di uno strato. Lo spessore reale dello strato è t , w è l'ampiezza dell'affioramento misurabile lungo il versante, h è l'ampiezza dell'affioramento ricavabile dalla carta geologica, v è il dislivello tra il contatto superiore e inferiore, δ è l'inclinazione dello strato e σ è l'inclinazione del pendio. (a) Misura nel caso di topografia orizzontale. (b-h) Misura dello spessore conoscendo l'ampiezza in campagna dell'affioramento (w). (i-m) Misura dello spessore ricavando l'ampiezza dell'affioramento dalla carta geologica e il dislivello tra i due contatti.

a reggipoggio, mentre l'estensione degli affioramenti sarà maggiore nel caso di strati a franapoggio.

Talvolta, per differenti motivi, in campagna non è possibile misurare direttamente lo spessore reale di uno strato (o di una formazione geologica). Se però disponiamo di alcune informazioni ricavabili dalla carta geologica possiamo ricavare indirettamente lo spessore di uno strato (*stratimetria*).

Il caso più semplice si ha nel caso di una topografia orizzontale (Fig. 2.10a), per ricavare lo spessore di uno strato inclinato è sufficiente misurare l'ampiezza dell'affioramento w nella direzione di immersione, cioè nella direzione ortogonale alla direzione e conoscere l'inclinazione δ dello strato (ricavabile realizzando una sezione geologica). Lo spessore dello strato è: $t = w \sin \delta$.

Se la superficie topografica non è orizzontale il calcolo dello spessore reale di uno strato richiede di conoscere l'ampiezza dell'affioramento come misurabile in campagna (w), l'inclinazione dello strato (δ) e l'inclinazione del pendio (σ). Le formule trigonometriche sono riportate in Fig. 2.10b per strati a franapoggio meno inclinati del pendio, in Fig. 2.10c per strati orizzontali, in Fig. 2.10d, e, f per strati a reggipoggio, in Fig. 2.10g per strati verticali e in Fig. 2.10h per strati a franapoggio più inclinati del pendio.

Se la superficie topografica non è orizzontale e se non è possibile conoscere l'ampiezza

dell'affioramento in campagna, è comunque possibile misurare lo spessore dello strato ricavando dalla carta geologica l'ampiezza dell'affioramento e il dislivello tra il contatto superiore e inferiore, oltre all'inclinazione dello strato e all'inclinazione del pendio. Le formule trigonometriche sono riportate in Fig. 2.10i per strati a franapoggio meno inclinati del pendio, in Fig. 2.10l per strati a reggipoggio e in Fig. 2.10m per strati a franapoggio più inclinati del pendio.

3

Curve di livello e inclinazione apparente

3.1 Curve di livello su superfici geologiche

Nelle carte topografiche la forma del terreno è rappresentata dalle curve di livello (isoipse), cioè dalle intersezioni tra la superficie topografica e una serie di ideali piani orizzontali a varia altezza rispetto al livello del mare e di spaziatura costante. Questo concetto può essere applicato anche alle superfici geologiche per rappresentare la loro orientazione e forma e trova una importante applicazione nella realizzazione di sezioni geologiche in aree limitate o in aree con una geometria semplice delle strutture geologiche, e sarà illustrato nel [Capitolo 4](#).

La [Fig. 3.1a](#) riporta uno schema tridimensionale con uno strato inclinato che interseca una superficie topografica, sul terreno lo strato affiora nell'area rappresentata in grigio. Dalla figura si vede che i punti x, y e z giacciono tutti alla quota di 400 m sopra il livello del mare. Poiché questi punti sono tutti alla solita altezza sulla solita superficie, la linea che li unisce definirà la curva di livello di 400 m sulla superficie dello strato. Tale curva è meglio visualizzata in [Fig. 3.1b](#) dove rispetto alla [Fig. 3.1a](#) è stata rimossa la parte di terreno sovrastante lo strato. Queste curve sono del tutto equivalenti alle curve di livello della carta topografica e nel caso particolare dell'esempio di [Fig. 3.1b](#) la curva è una linea retta perché la superficie è un piano. È importante notare che *quando un contatto taglia in due punti la solita isoipsa, la linea che unisce i due punti è la direzione (strike) dello strato*.

Nella [Fig. 3.1c](#) sono state costruite le curve di livello per il limite superiore (tetto) dello strato per le quote di 400, 500, 600 e 700 metri, *unendo i punti in cui il contatto a tetto dello strato incontra queste isoipse*. La superficie che contiene tutte queste linee rappresenta il limite superiore dello strato. Dalla [Fig. 3.1d](#) si vede come una parte del piano, quella rappresentata in grigio, è al di sotto del terreno, mentre la parte in bianco è al di sopra dell'attuale morfologia. Poiché la superficie geologica è piana la spaziatura delle curve di livello è costante e le curve sono delle linee tra loro parallele.

Nella realtà solo raramente e ad una piccola scala di osservazione le superfici geologiche sono superfici piane, nella maggior parte dei casi si tratta di superfici non piane, cioè curve. Superfici geologiche non piane avranno curve di livello rappresentate da linee con spaziatura variabile, oppure da linee curve. La [Fig. 3.2a](#) mostra una superficie non piana di direzione costante ma inclinazione variabile (è il caso normale in presenza di pieghe con

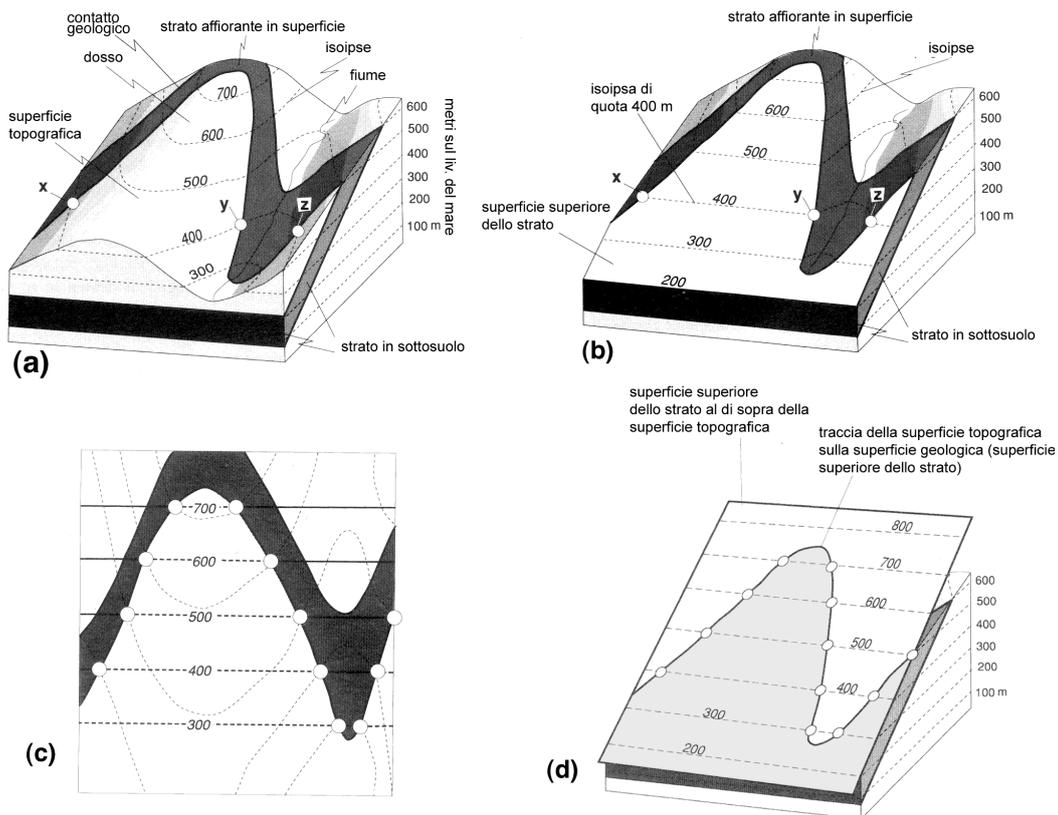


Figura 3.1 (a) Contatti geologici per uno strato inclinato. (b) Superficie superiore dello strato e relative curve di livello. (c) Vista dall'alto, in carta, delle curve di livello per il tetto dello strato. (d) Prolungamento verso l'alto della superficie planare che rappresenta il tetto dello strato.

asse orizzontale), le curve di livello su questa superficie saranno rettilinee, ma di spaziatura variabile (Fig. 3.2b,c).

La Fig. 3.2d mostra invece una superficie non piana di inclinazione costante, ma direzione variabile, in questo caso le curve di livello saranno delle linee curve, ma di spaziatura costante (Fig. 3.2e, f). In natura solitamente si ha a che fare con superfici geologiche non piane e con inclinazione e direzione variabile, le curve di livello delle superfici geologiche reali saranno quindi comunemente linee curve di spaziatura variabile.

La Fig. 3.3 illustra vari contatti in una carta geologica, i contatti hanno inclinazioni differenti nei vari casi.

La rappresentazione della geometria di una superficie geologica mediante curve di livello è molto importante se vogliamo stabilire se una superficie è planare, piegata, ecc. ed è fondamentale per la realizzazione di sezioni geologiche, come illustrato nel **Capitolo 4**.

3.2 Inclinazione reale e inclinazione apparente

Consideriamo una superficie inclinata di cui vogliamo conoscere l'inclinazione, come quella in Fig. 3.4a su cui è riportata la direzione e la direzione di immersione. La Fig. 3.4b mostra le curve di livello su questa superficie, mentre la Fig. 3.4c rappresenta la vista dall'alto, cioè la rappresentazione in carta. Sulla superficie inclinata consideriamo due punti (a e c) che in Fig. 3.4b hanno dislivello verticale di 100 m e distanza orizzontale, misurata

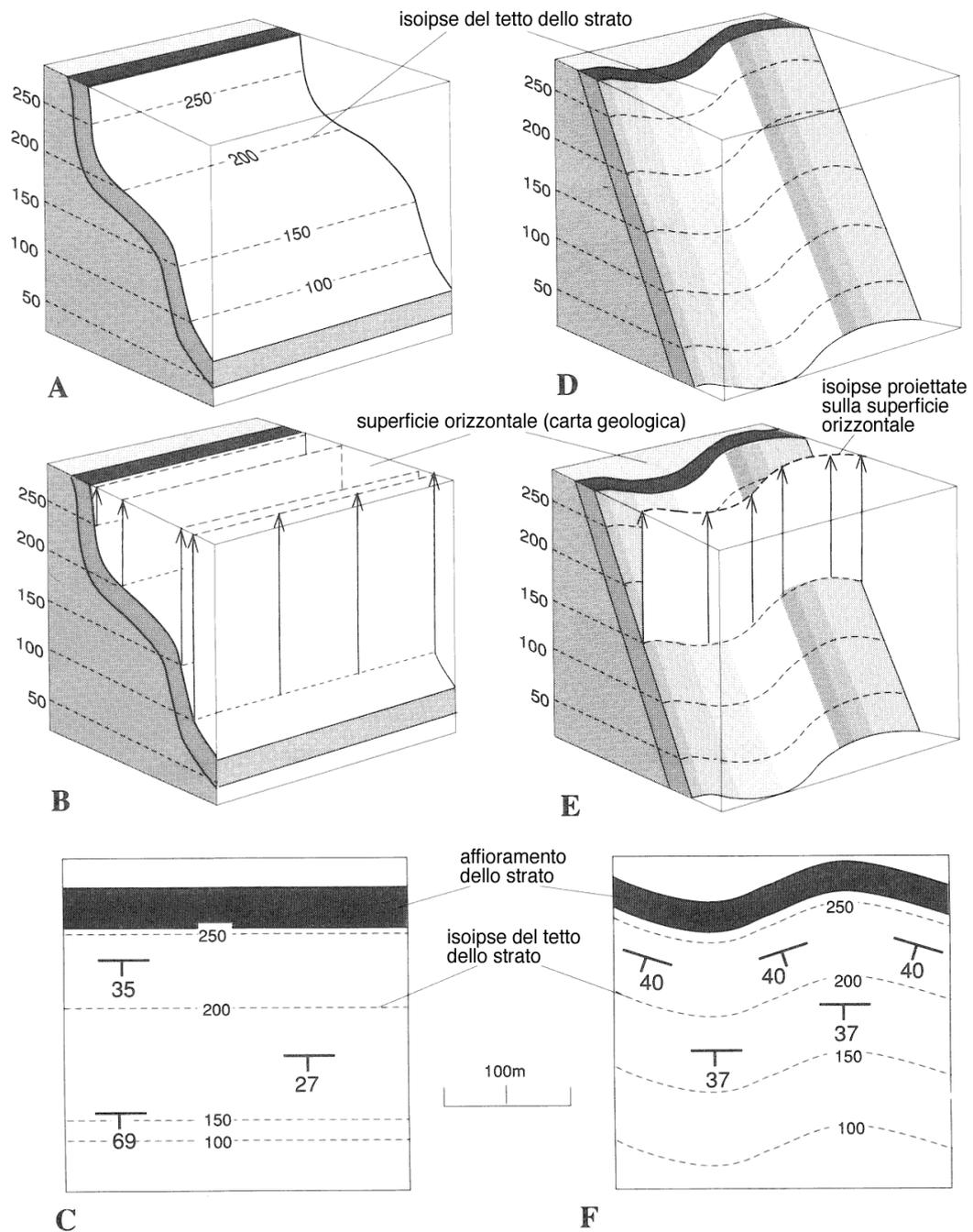


Figura 3.2 Rappresentazione mediante curve di livello di superfici geologiche non piane.

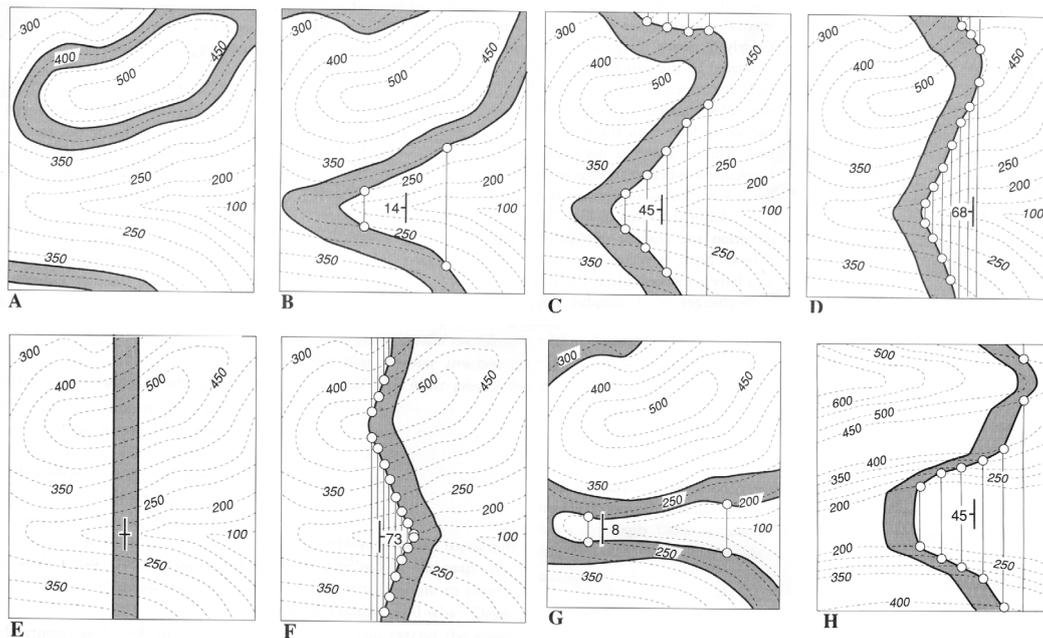


Figura 3.3 Contatti geologici originati da uno strato di spessore costante variamente inclinato rispetto al versante, le curve di livello sul contatto hanno quindi spaziatura differente. (a) Strato orizzontale. (b) Strato a reggipoggio debolmente inclinato. (c) Strato a reggipoggio mediamente inclinato. (d) Strato a reggipoggio fortemente inclinato. (e) Strato verticale. (f) Strato a franapoggio, più inclinato del versante. (g) Strato a franapoggio, meno inclinato del versante. (h) Variazioni di spessore dovute alla topografia.

in Fig. 3.4c, di 120 m. Come si vede in Fig. 3.4d l'inclinazione della superficie è l'angolo la cui tangente è bc/ab , cioè $100/120=0,83$. L'inclinazione è quindi 40° . L'inclinazione così calcolata è anche detta *inclinazione reale* dello strato.

Se l'inclinazione del piano viene misurata in qualsiasi altra direzione diversa dalla direzione di immersione, l'angolo di inclinazione risulta inferiore. In Fig. 3.4e misuriamo l'inclinazione tra il punto d e il punto c, il punto d ha la stessa quota del punto a visto in precedenza. L'inclinazione in questo caso sarà data da: $bc/bd = 100/225 = 0,444$, cioè l'angolo è 24° .

L'inclinazione di una superficie misurata in una direzione che non è la sua direzione di immersione è detta inclinazione apparente, ed è sempre minore dell'inclinazione reale, in altre parole l'inclinazione di uno strato su una sezione geologica non parallela alla direzione di immersione è minore dell'inclinazione reale dello strato. È intuitivo che l'inclinazione apparente misurata su una sezione parallela alla direzione dello strato è zero, cioè lo strato appare orizzontale in sezione.

Vediamo questo concetto dell'inclinazione con un semplice esempio di un modello tridimensionale, rappresentato in Fig. 3.5.

In questo modello Fig. 3.5a sono rappresentati una serie di strati che immergono verso Est con una inclinazione di 20° (90/20). Questo modello è tagliato da quattro sezioni geologiche, differentemente orientate (Fig. 3.5b):

- la sezione A-A' (Fig. 3.5c) ha una direzione (strike) N90E, è quindi coincidente con la direzione di immersione degli strati, in sezione gli strati hanno inclinazione di 20° , cioè mostrano l'inclinazione reale;
- la sezione B-B' (Fig. 3.5c) ha una direzione (strike) N64E, in sezione gli strati hanno

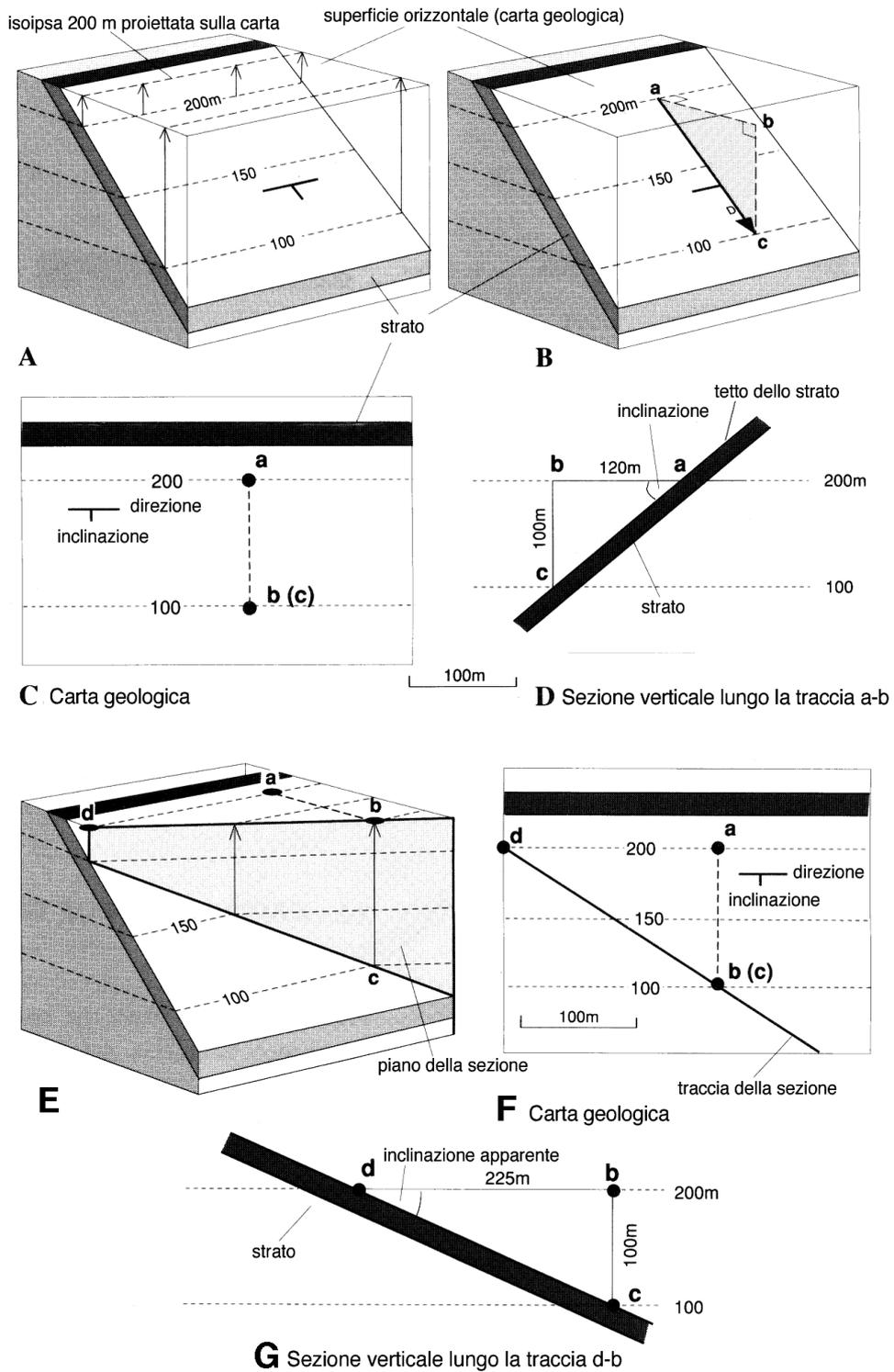


Figura 3.4 Calcolo dell'inclinazione reale (a,b,c,d) e dell'inclinazione apparente (e,f,g,h) di uno strato. L'inclinazione apparente è sempre minore dell'inclinazione.

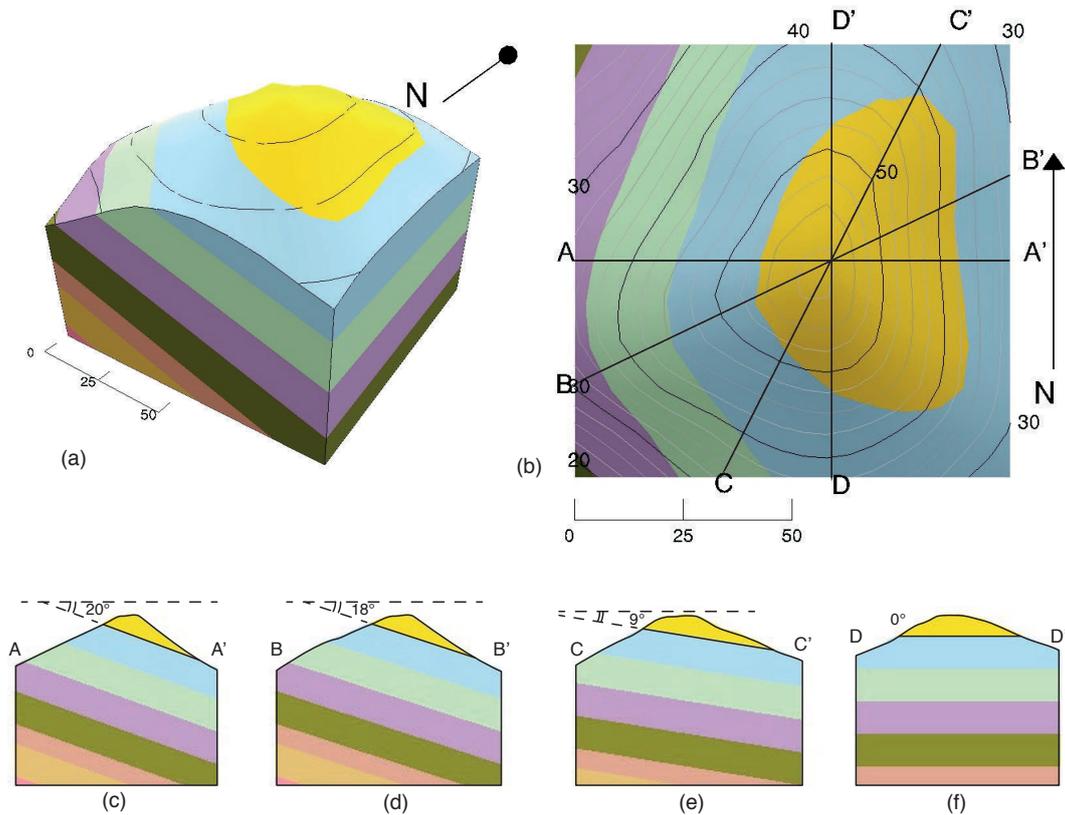


Figura 3.5 Inclinazione apparente in una serie di sezioni geologiche. (a) Modello tridimensionale. (b) Carta geologica. (c)-(f) Sezioni geologiche diversamente orientate, è indicato l'angolo dell'inclinazione dei contatti nelle varie sezioni.

inclinazione apparente di 18° ;

- la sezione C-C' (Fig. 3.5c) ha una direzione (strike) N26E, in sezione gli strati hanno inclinazione apparente di 9° ;
- la sezione D-D' (Fig. 3.5c) ha una direzione (strike) Nord-Sud, parallela cioè alla direzione degli strati, in sezione gli strati sono orizzontali.

3.3 Calcolo dell'inclinazione apparente

3.3.1 Metodi trigonometrici e grafici

Per calcolare l'inclinazione apparente di uno strato da riportare in una sezione geologica consideriamo l'esempio di Fig. 3.6, in cui è indicato in grigio uno strato la cui direzione forma un angolo γ con la traccia della sezione geologica, l'inclinazione è α e l'inclinazione apparente è ω . Dal triangolo ABE si ricava: $AE = BE \cdot \tan \alpha$, mentre dal triangolo AEF si ha: $AE = EF \cdot \tan \omega$.

Ne deriva:

$$BE \tan \alpha = EF \tan \omega \quad \text{cioè} \quad \tan \omega = \frac{BE}{EF} \tan \alpha \quad (3.1)$$

Dal triangolo BEF ricaviamo:

$$BE = EF \sin \gamma \quad \text{cioè} \quad \sin \gamma = \frac{BE}{EF} \quad (3.2)$$

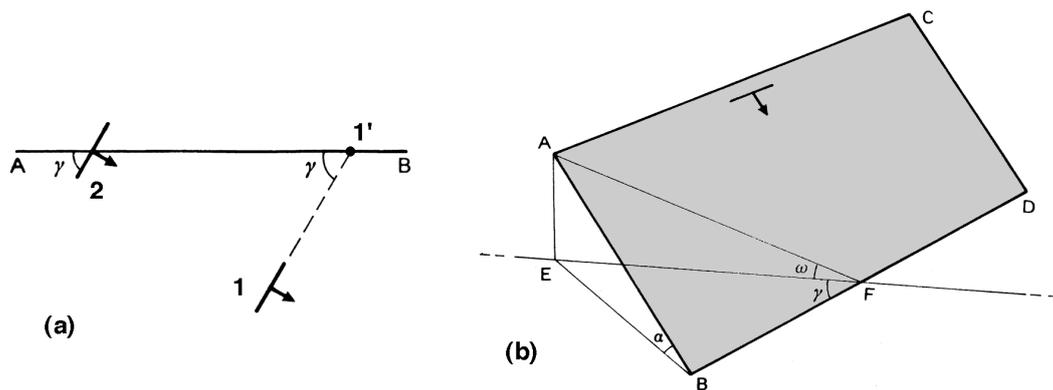


Figura 3.6 Elementi per il calcolo dell'inclinazione apparente. γ : angolo tra direzione dello strato e la traccia della sezione, α : inclinazione dello strato, ω : inclinazione apparente dello strato sulla sezione.

Ne consegue che:

$$\tan \omega = \tan \alpha \cdot \sin \gamma \quad (3.3)$$

L'Eq. 3.3 ci permette di calcolare ω , cioè l'inclinazione apparente, conoscendo l'inclinazione reale α e l'angolo tra la direzione dello strato e la traccia della sezione γ . L'inclinazione apparente ω varia tra 0° e α . Vale 0° quando è nulla l'inclinazione reale (strati orizzontali) oppure quando è nullo l'angolo γ (la sezione geologica è parallela alla direzione degli strati). L'inclinazione apparente coincide invece con l'inclinazione reale quando $\gamma = 90^\circ$ (la traccia della sezione geologica è ortogonale alla direzione degli strati) oppure quando gli strati sono verticali.

Se non si vuole risolvere l'Eq. 3.3 per ogni misura per ricavare l'inclinazione apparente, si possono usare dei diagrammi che offrono una soluzione grafica di tale equazione. Una di queste scale grafiche è riportata in Fig. 3.7.

3.3.2 Proiezioni stereografiche

Un altro modo pratico per il calcolo dell'inclinazione apparente di una misura su una sezione geologica è l'utilizzo delle proiezioni stereografiche. Il calcolo in proiezione stereografica dell'inclinazione apparente di una misura su una sezione geologica equivale al calcolo dell'intersezione tra due piani: tra una superficie inclinata (la misura) e una superficie verticale (la sezione geologica). In proiezione stereografica l'inclinazione apparente è l'inclinazione della linea intersezione tra i due piani, come illustrato in Fig. 3.8.

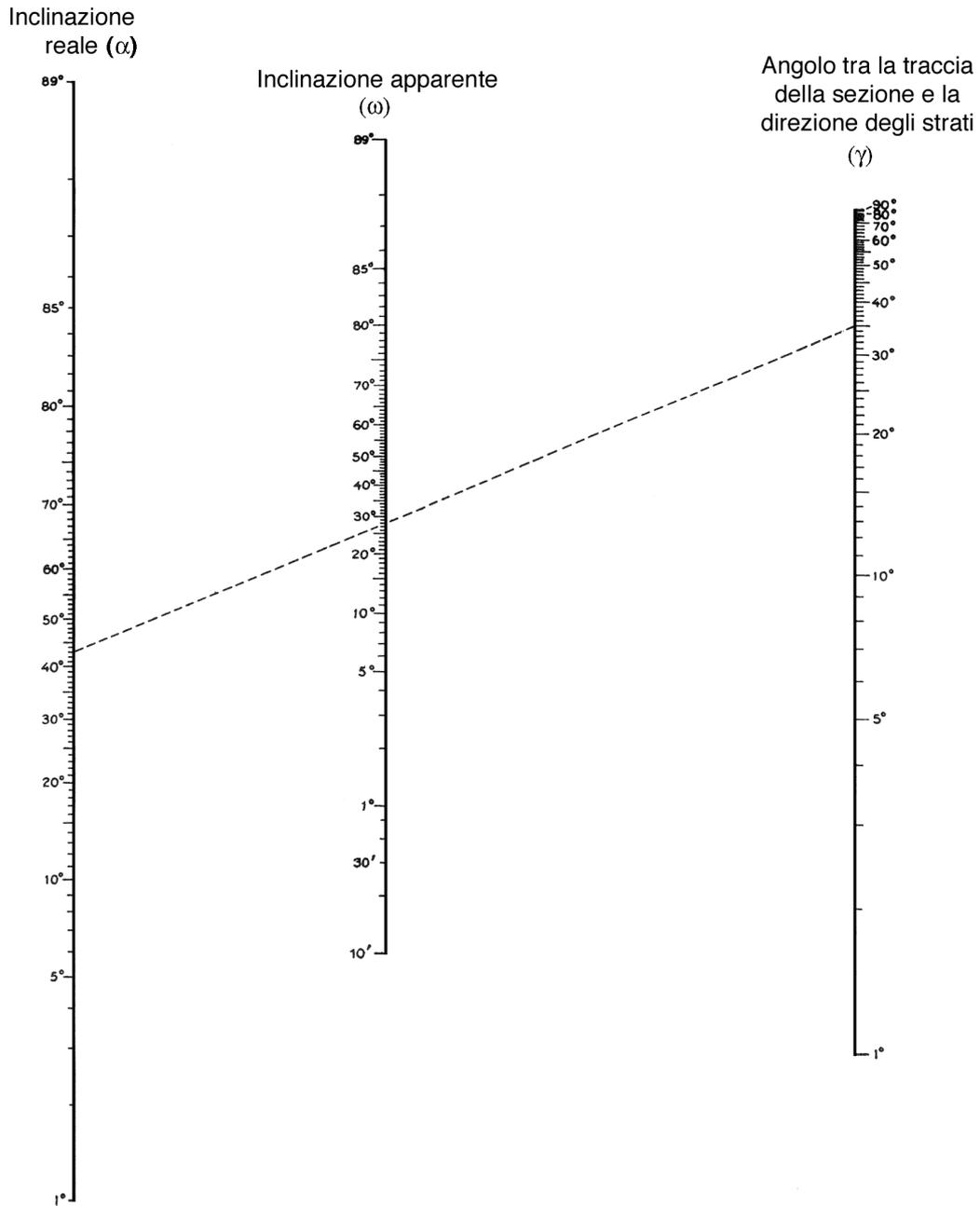


Figura 3.7 Diagramma per determinare l'inclinazione apparente in una sezione geologica, nota l'inclinazione e l'angolo tra la traccia della sezione e la direzione degli strati (PALMER, 1919). Con una linea retta si unisce il valore dell'inclinazione (scala a sinistra) con il valore dell'angolo tra la traccia e la direzione degli strati (scala a destra), nella scala centrale si legge il corrispondente valore dell'inclinazione apparente. Per la definizione degli angoli vedi Fig. 3.6.

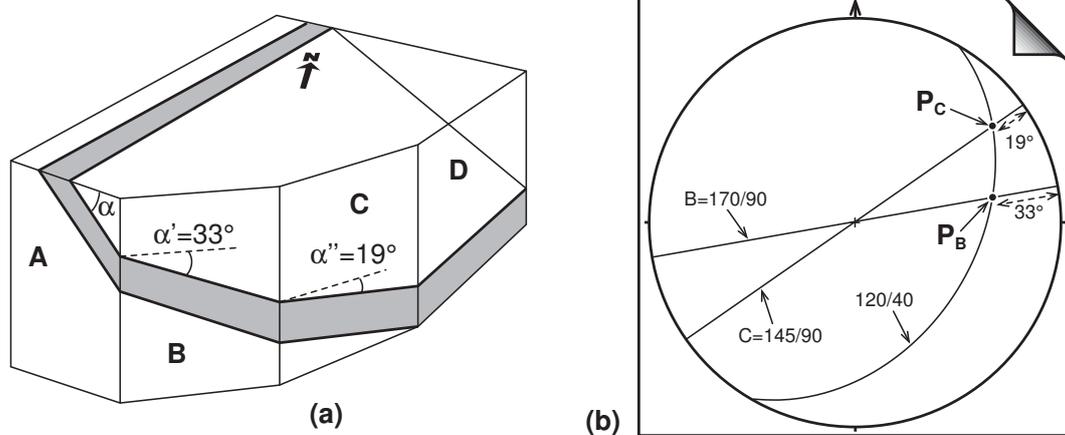


Figura 3.8 Uso delle proiezioni stereografiche per determinare l'inclinazione apparente. (a) Inclinazione apparente di uno strato (in grigio) su varie sezioni verticali. La sezione A è ortogonale alla direzione (*strike*) dello strato e perciò parallela alla direzione di massima pendenza dello strato, l'angolo α in sezione è quindi uguale all'inclinazione dello strato; la sezione B ha orientazione 170/90 e $\alpha = 33^\circ$ è l'inclinazione apparente dello strato su questa superficie; la sezione C ha orientazione 145/90 e $\alpha = 33^\circ$ è l'inclinazione apparente dello strato su questa superficie; la sezione D è parallela alla direzione dello strato, lo strato appare quindi orizzontale su questa superficie (in altre parole lo strato ha un'inclinazione apparente uguale a zero su questa superficie). (b) Proiezione stereografica delle sezioni illustrate in (a), lo strato in grigio ha giacitura 120/40. P_B e P_C sono le linee intersezione tra le sezioni B e C e lo strato, la cui inclinazione (33° e 19°) è l'inclinazione apparente dello strato su di esse.

4

Sezioni geologiche con il metodo delle curve di livello

Nel **Capitolo 3** è stato visto come sia possibile rappresentare l'andamento di una superficie geologica mediante delle curve di livello, in questo Capitolo vedremo come da queste informazioni sia possibile realizzare delle sezioni geologiche. Come esempio vediamo come realizzare una semplice sezione geologica mediante l'uso delle curve di livello attraverso la struttura di **Fig. 4.1**.

Per realizzare la sezione si deve:

- a) Su un foglio di carta millimetrata realizzare il profilo topografico in corrispondenza della traccia della sezione geologica. Marcare chiaramente l'inizio e la fine della sezione geologica e le lettere che identificano le estremità (A e A').
- b) Sulla carta geologica costruire le linee che rappresentano le curve di livello del tetto dello strato a varie quote, unendo i due punti in cui il contatto geologico interseca la solita isoipsa. Siccome in questo semplice esempio lo strato è planare e l'inclinazione è costante (lo strato non è piegato) le curve di livello dello strato saranno linee rette tra loro parallele.
- c) Porre il foglio di carta millimetrata parallelo alla traccia della sezione geologica e su di esso marcare i punti in cui le curve di livello dello strato intersecano la traccia della sezione geologica. Usare simboli diversi per questi punti a seconda se si tratta del tetto o della base dello strato e annotare a fianco la quota in metri.
- d) Sul foglio di carta millimetrata posizionare i punti così determinati alla corrispondente quota.
- e) Unire i punti relativi al tetto dello strato e quelli relativi alla base, le due linee così costruite rappresentano la base e il tetto dello strato, cioè due contatti litologici, sulla sezione geologica.
- f) Prolungare eventualmente verso il basso e verso l'alto, al di sopra dell'attuale topografia, i due contatti.

Dalla sezione geologica così costruita è possibile ricavare informazioni quali l'inclinazione dello strato e il suo spessore.

Un esempio pratico di realizzazione di una sezione con il metodo delle curve di livello è riportato in **Fig. 4.2**.

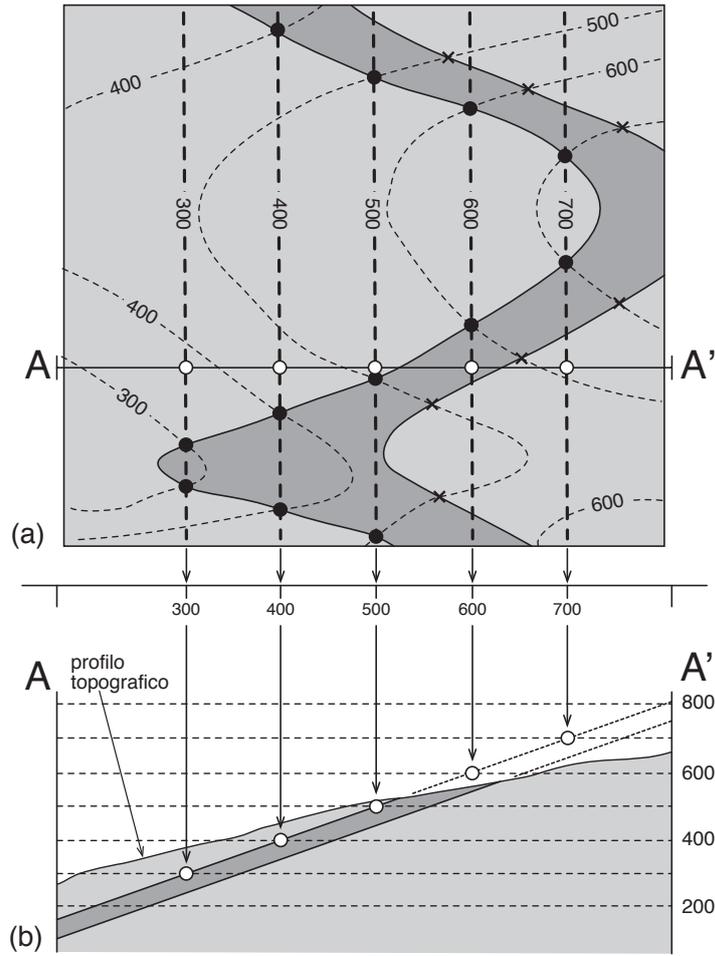


Figura 4.1 (a) Carta geologica semplificata con uno strato immergente verso Ovest. (b) Sezione geologica con il metodo di proiezione mediante curve di livello. È riportata la costruzione solo per i punti del tetto dello strato. La solita procedura andrà fatta per la base dello strato (i punti di intersezione della base dello strato con la topografia sono indicati con "x".)

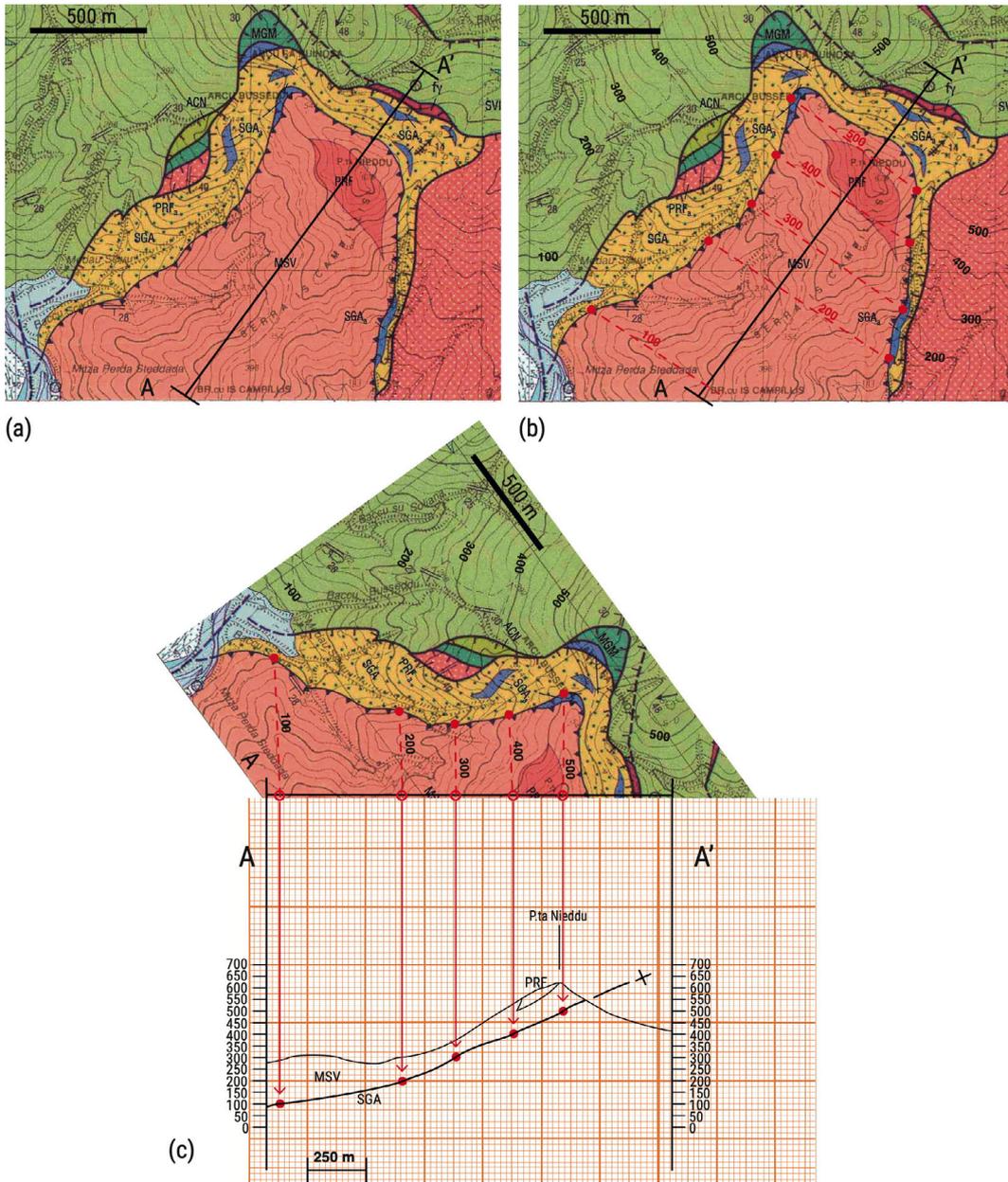


Figura 4.2 Realizzazione di una sezione geologica con il metodo delle curve di livello.

5

Variazione della scala verticale

5.1 Esagerazione verticale

Solitamente una sezione geologica si costruisce in modo tale che la scala orizzontale e scala verticale del profilo siano uguali. Questo solitamente è il modo corretto di costruzione di una sezione in quanto produce una rappresentazione reale della morfologia dell'area e delle strutture geologiche presenti.

In alcuni casi particolari però può essere utile costruire delle sezioni in cui la scala verticale della sezione geologica è diversa da quella orizzontale. Questo, per esempio, è il caso se si realizzano sezioni geologiche in aree con morfologia pressoché piatta e si vuole comunque rappresentare le valli e i rilievi esistenti. Altro caso è quando si realizzano sezioni geologiche di lunghezza molto rilevante (sezioni lunghe decine o centinaia di chilometri) per rappresentare strutture a scala continentale, e si vuole comunque rappresentare le principali forme del rilievo (Fig. 5.1). Sezioni geologiche con esagerazione verticale sono inoltre talvolta costruite in aree in cui lo spessore delle formazioni geologiche rispetto alla scala della carta è molto piccolo e impossibile da rappresentare.

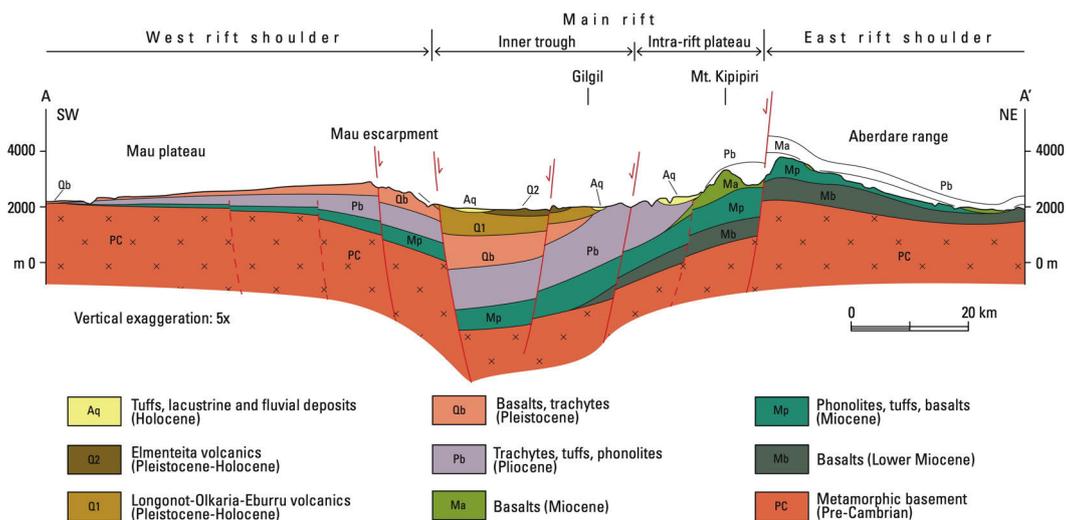


Figura 5.1 Sezione geologica attraverso la Rift Valley in Kenya. la sezione ha un'esagerazione verticale 5x.

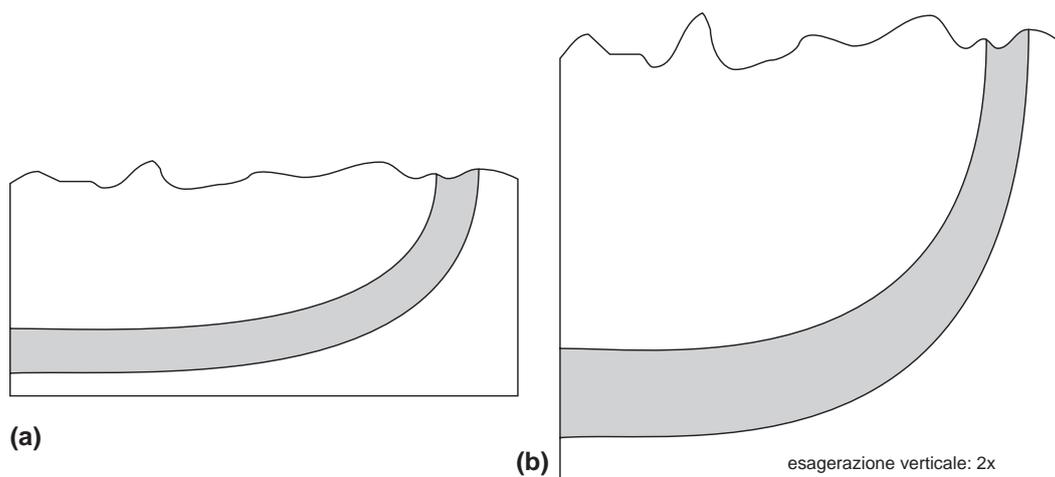


Figura 5.2 Distorsione della forma di uno strato a seguito di un'esagerazione verticale (a) Sezione originale, senza esagerazione verticale. (b) Sezione con una esagerazione verticale: 2x.

Solitamente quando si realizzano sezioni in cui la scala verticale e orizzontale non sono uguali si ha che la scala verticale della sezione è maggiore della scala orizzontale. Il contrario non accade quasi mai.

Per *Esagerazione verticale* di una sezione si intende quindi un numero che ci dice di quante volte la scala verticale è stata allungata rispetto alla scala orizzontale. Per esempio, se in calce ad una sezione troviamo indicato "Esagerazione Verticale: 3x", significa che le misure sulla verticale sono tre volte più grandi rispetto alle misure in orizzontale.

Una esagerazione verticale in una sezione induce una generale apparente distorsione delle strutture geologiche presenti, cioè un apparente aumento dello spessore delle formazioni, che è maggiore negli strati orizzontali che in quelli verticali, e della forma delle strutture a pieghe (Fig. 5.2).

5.2 Calcolo dell'esagerazione verticale

L'Esagerazione verticale (VE) di una sezione è definita come il rapporto tra la Scala Verticale (VS) e la Scala Orizzontale (HS) della sezione:

$$VE = \frac{VS}{HS} \quad (5.1)$$

Se, per esempio, in una sezione la scala verticale è di 1:5.000 e la scala orizzontale è di 1:20.000, si ha:

$$VE = \frac{\frac{1}{5.000}}{\frac{1}{20.000}} = \frac{1}{5.000} \cdot \frac{20.000}{1} = 4$$

cioè l'esagerazione verticale (VE) è 4x.

Supponiamo invece di avere una sezione geologica e notiamo che la scala verticale e orizzontale sono diverse ma sulla sezione non è indicata l'esagerazione verticale e vogliamo ricavarla. Dobbiamo operare in questo modo:

- a) misuriamo sulla verticale un certo intervallo, per esempio 1 cm, e vediamo a quanti metri o chilometri corrisponde (per esempio a 20 metri);

b) misuriamo in orizzontale lo stesso intervallo, per esempio sempre 1 cm, e vediamo a quanti metri o chilometri corrisponde (pre esempio a 130 metri).

In base all'Eq. 5.1 si ha:

$$VE = \frac{\frac{1}{20}}{\frac{1}{130}} = \frac{1}{20} \cdot \frac{130}{1} = 6,5$$

L'esagerazione verticale è quindi 6,5x.

6

Riconoscimento in carta di discordanze, faglie, pieghe

In una certa carta geologica possono essere presenti vari tipi di strutture geologiche. Le differenti strutture geologiche producono contatti con geometria particolare, che possono essere riconosciuti una carta geologica. In questo Capitolo saranno illustrate le varie geometrie di contatti legati allo sviluppo delle strutture geologiche più comuni quali discordanze, faglie, pieghe, e nel caso di depositi alluvionali e intrusioni. Il riconoscimento dell'andamento di questi contatti ci permette di riconoscere quindi le strutture presenti in carta.

6.1 Discordanze

Ogni formazione geologica ha una superficie limite inferiore ed una superiore, il passaggio alla formazione sovrastante e sottostante può essere continuo (senza lacuna di sedimentazione) oppure discontinuo (con lacuna di sedimentazione). *Concordante* si dice un contatto tra due formazioni nel caso in cui gli strati siano tra loro paralleli e in continuità di sedimentazione. Quando ciò non avviene un contatto si dice *discordante*.

Una *discordanza* (ingl. *unconformity*) è una discontinuità, una interruzione della sedimentazione, accompagnata da erosione degli strati sottostanti, gli strati al di sopra della discordanza sono più giovani degli strati al di sotto.

Si distinguono i seguenti tipi di discordanze (Fig. 6.1):

- a) *nonconcordanza* (discordanza semplice, *nonconformity*): si ha nel caso in cui la successione non è costituita tutta da rocce sedimentarie, ma la superficie di erosione interessa rocce metamorfiche o magmatiche (al di sotto) e al di sopra si deposita una successione sedimentaria;
- b) *discordanza angolare* (*angular unconformity*): discontinuità in una successione stratigrafica in corrispondenza della quale i piani di stratificazione delle unità sottostanti e sovrastanti formano un angolo gli uni rispetto agli altri, indicando deformazione prima dell'erosione;
- c) *disconformità* (*disconformity*): discontinuità in una successione stratigrafica in corrispondenza della quale i piani di stratificazione delle unità sottostanti e sovrastanti sono paralleli, ma è presente una marcata superficie erosionale, cioè una troncatura

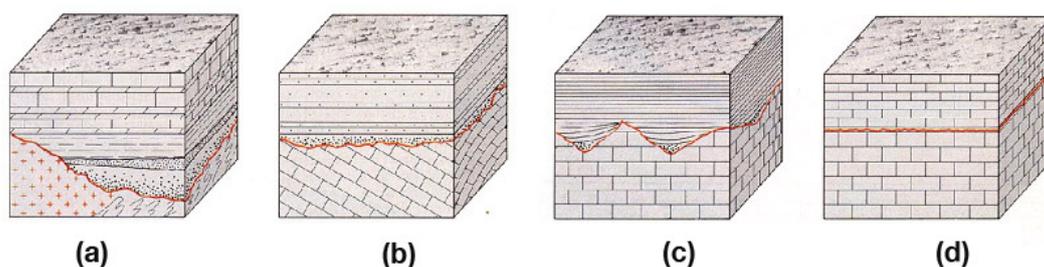


Figura 6.1 Tipi di discordanze. (a) Nonconcordanza. (b) Discordanza angolare. (c) Disconformità. (d) Paraconcordanza.

erosiva degli strati sottostanti, indica che non c'è stata alcuna fase deformativa prima dell'erosione;

- d) *paraconcordanza (paraconformity)*: discontinuità in una successione stratigrafica in corrispondenza della quale i piani di stratificazione delle unità sottostanti e sovrastanti sono paralleli, e non è evidente una netta superficie erosionale. Si ha una discontinuità nella sedimentazione che può essere dimostrata solo dall'età molto differente al di sopra e al di sotto della superficie di paraconcordanza.

Vediamo alcuni esempi del caso più complicato dal punto di vista geometrico, quello della discordanza angolare.

La Fig. 6.2 mostra la geometria di una discordanza angolare, con degli strati immergenti verso Est al di sotto della discordanza e degli strati orizzontali al di sopra. Nel caso di un rilievo (Fig. 6.2a,c), gli strati al di sopra della discordanza seguiranno le isoipse e avranno quindi un andamento chiuso, gli strati al di sotto sono inclinati a reggipoggio in un versante e a franapoggio più inclinato del pendio nell'altro versante e quindi la concavità in entrambi i versanti è verso Est, cioè verso le formazioni sovrastanti.

Nel caso di una valle (Fig. 6.2b,d), gli strati al di sopra della discordanza seguiranno le isoipse e avranno quindi un andamento parallelo alle isoipse, gli strati al di sotto immergono verso Est e quindi in corrispondenza della valle avranno un andamento a "v", con la punta della "v" orientata verso Est.

6.2 Faglie

6.2.1 Riconoscimento di faglie

Nelle carte geologiche le faglie sono indicate di solito con un apposito simbolismo (vedi Fig. 1.4), le faglie dirette solitamente con una linea rossa con dei trattini ortogonali alla linea stessa, rivolti verso il blocco che si è spostato verso il basso. Per le faglie inverse o i sovrascorrimenti si usa di solito una linea rossa con dei triangoli rivolti verso il tetto della faglia, cioè verso il blocco sovrascorso. Le faglie sono comunque facilmente riconoscibili in una carta geologica in quanto interrompono la continuità dei contatti geologici e portano a diretto contatto formazioni di età diversa che normalmente non sono a diretto contatto tra loro.

Le informazioni ricavabili da una carta geologica spesso consentono di stabilire il tipo di movimento relativo delle due parti di una faglia (diretto, inverso, trascorrente), ma di solito è molto difficile stabilire l'esatta direzione ed entità del movimento (rigetto) lungo

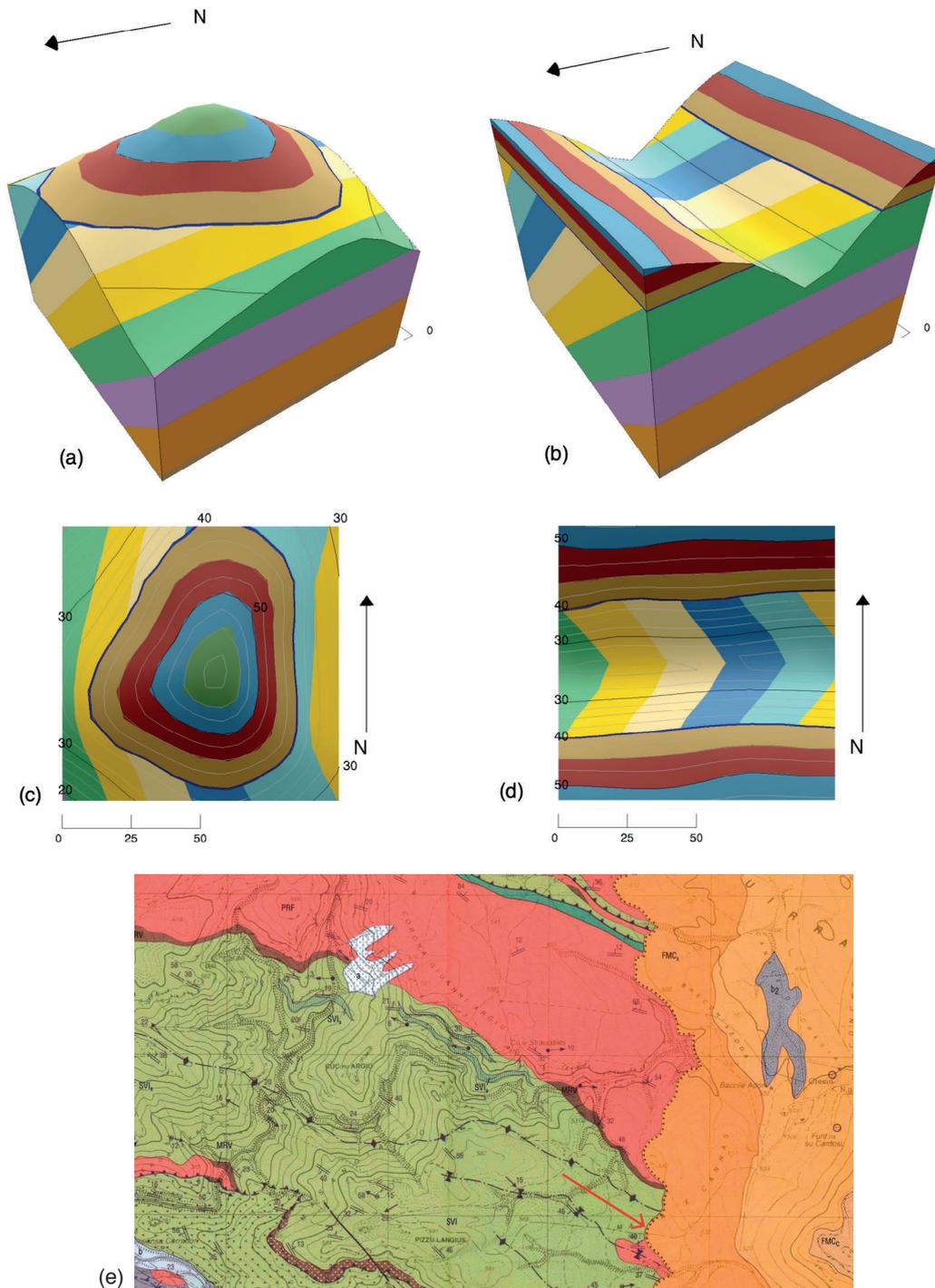


Figura 6.2 Modelli tridimensionali e carte geologiche con una discordanza angolare, nel caso di un rilievo (a,c) e di una valle (b,d). La superficie di discordanza è orizzontale ed è indicata dalla linea blu. (e) Esempio di discordanza semplice (*non-conformity*) in una carta geologica, la discordanza è indicata dalla freccia. La discordanza è alla base della formazione FMC (formazione di origine sedimentaria e in giacitura orizzontale), mentre al di sotto si ha un complesso di rocce metamorfiche con sovrascorrimenti e strutture plicative (anticlinali e sinclinali) e con una immersione generale dei contatti e della foliazione principale verso Nord-Est.

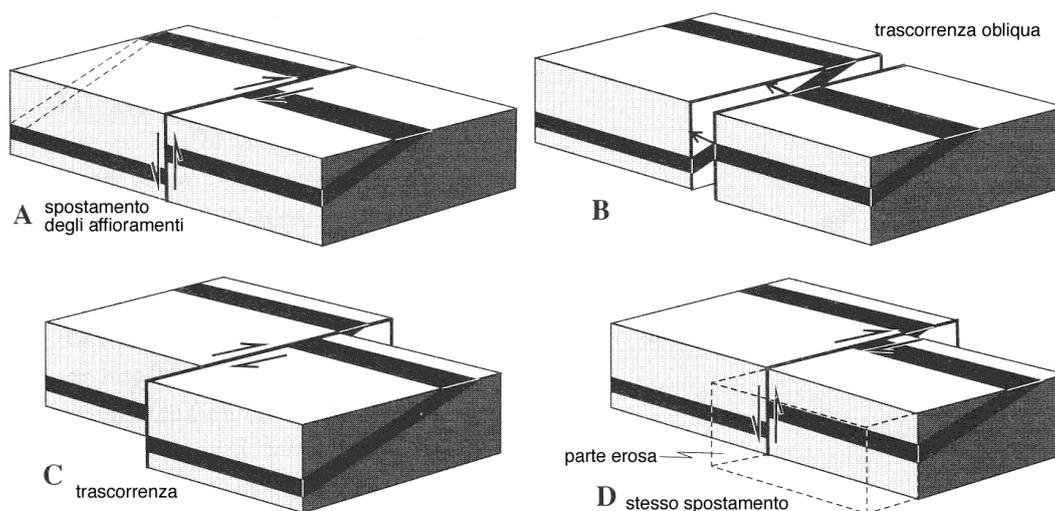


Figura 6.3 In una carta geologica (superficie orizzontale) i soliti affioramenti possono essere generati da movimenti differenti lungo una faglia.

la superficie di faglia. Questo perché le solite forme di affioramento nella carta geologica possono essere generate da differenti tipi di movimento.

Nell'esempio di Fig. 6.3a si vede come appaiono in una carta geologica (superficie orizzontale) e in sezione geologica (superficie verticale) due contatti dislocati da una faglia. Questo andamento dei contatti può essere dovuto ad un movimento obliquo delle due parti della faglia (Fig. 6.3b) oppure ad un movimento di tipo trascorrente (Fig. 6.3c,d). In assenza di altre informazioni dalla semplice analisi della carta è impossibile stabilire l'esatto tipo di movimento (obliquo o trascorrente), ma però è possibile stabilire quale è la parte della faglia che viene abbassata o alzata durante il movimento o se il movimento è destro o sinistro.

Faglie con rigetto essenzialmente verticale si riconoscono se nella carta non spostano contatti verticali (es. filoni, contatti tra rocce intrusive e incassante, piani assiali di pieghe, ecc.). Faglie trascorrenti si riconoscono in quanto in carta non spostano contatti orizzontali, ma i contatti inclinati sono tutti spostati nella solita direzione e della solita entità.

L'analisi di una carta geologica permette anche di stabilire l'intervallo di tempo durante il quale è stata attiva una faglia. Il limite inferiore di questo intervallo di tempo è dato dall'età della più recente formazione o struttura (piegamento, metamorfismo, ecc.) tagliata dalla faglia. Il limite superiore di questo intervallo di tempo è dato dall'età della più antica formazione geologica o struttura che non è tagliata dalla faglia. Il limite superiore può essere rappresentato da discordanze che suturano la faglia o intrusioni che attraversano la faglia senza essere dislocate. Se sono presenti pieghe che ripiegano la faglia questo implica che la faglia è più antica del piegamento.

Riconoscimento di faglie dirette

Nel caso di faglie dirette (faglie in cui il tetto si abbassa) tutti i contatti al tetto della faglia saranno ad una quota minore rispetto a i soliti contatti nell'area a letto della faglia. Vediamo questo nell'esempio di Fig. 6.4.

In Fig. 6.4a è raffigurata un'area in corrispondenza di un rilievo in cui è presente una faglia diretta immergente verso Est che taglia una successione stratigrafica orizzontale. Il punto rosso (indicato dalla freccia rossa) indica il punto dove il contatto tra la formazione A

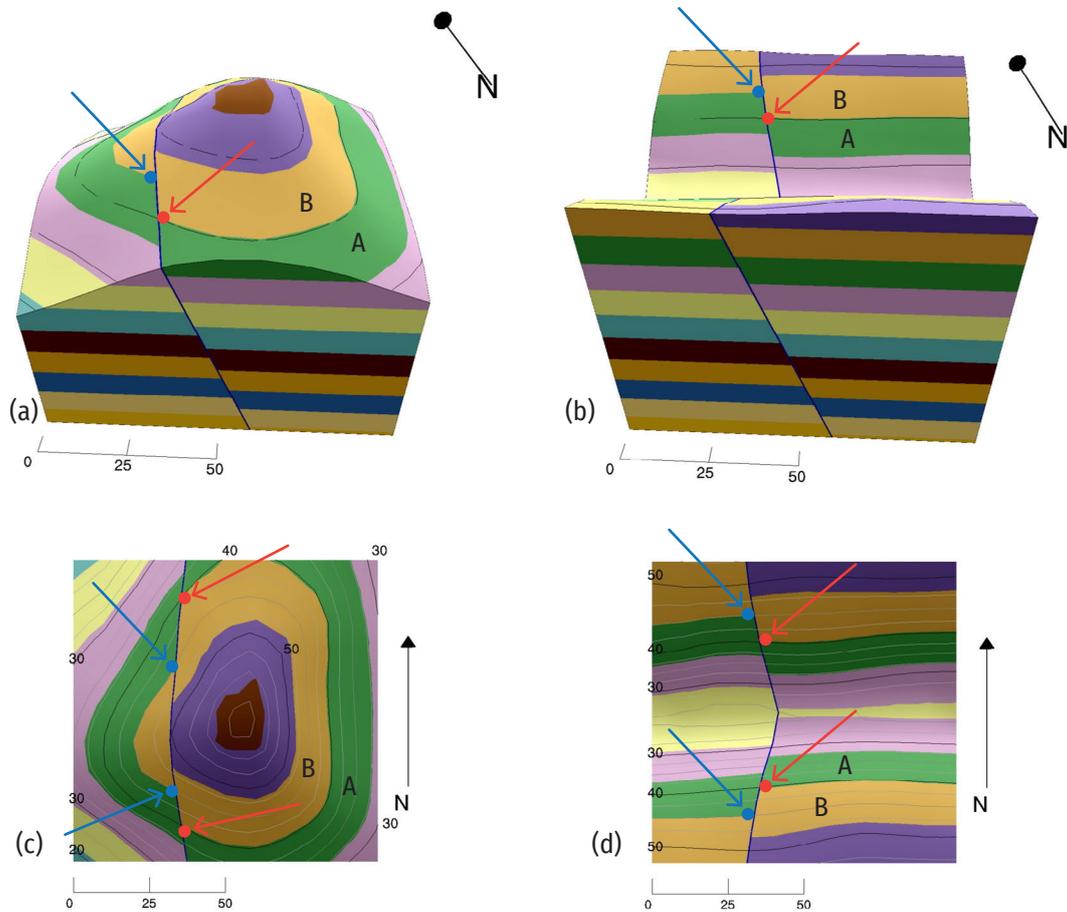


Figura 6.4 (a) Faglia diretta immergente verso Est che taglia una successione orizzontale, in un'area con un rilievo. (b) Faglia diretta in un'area con una valle. (c,d) Carte geologiche relative. I punti rossi e blu indicano punti omologhi, cioè punti che prima dello spostamento legato all'attività della faglia si trovavano accanto, nella stessa posizione.

e la formazione B, al tetto della faglia, incontra la superficie di faglia. Il punto blu (indicato dalla freccia blu) indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, a letto della faglia, incontra la superficie di faglia. È chiaro dalla Fig. 6.4a che il punto rosso è a una quota minore rispetto al punto blu, questo perché siamo in presenza di una faglia diretta. Questo è ben evidente anche nella relativa carta geologica di Fig. 6.4c.

La situazione nel caso di una faglia diretta in un'area con una valle è illustrata in Fig. 6.4b. Il punto rosso indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, al tetto della faglia, incontra la superficie di faglia. Il punto blu indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, a letto della faglia, incontra la superficie di faglia. Anche in questo caso è evidente che il punto rosso è a una quota minore rispetto al punto blu, questo perché siamo in presenza di una faglia diretta. Questo è osservabile anche nella relativa carta geologica di Fig. 6.4d.

È importante notare come nella carta geologica di Fig. 6.4c, se ci muoviamo lungo la superficie di faglia, i due punti sembrano dislocati con un movimento sinistrale a Nord del rilievo, mentre sembrano dislocati con movimento destrale a Sud del rilievo. Questa apparente incongruenza è legata al fatto che la faglia in questione non è una faglia tra-

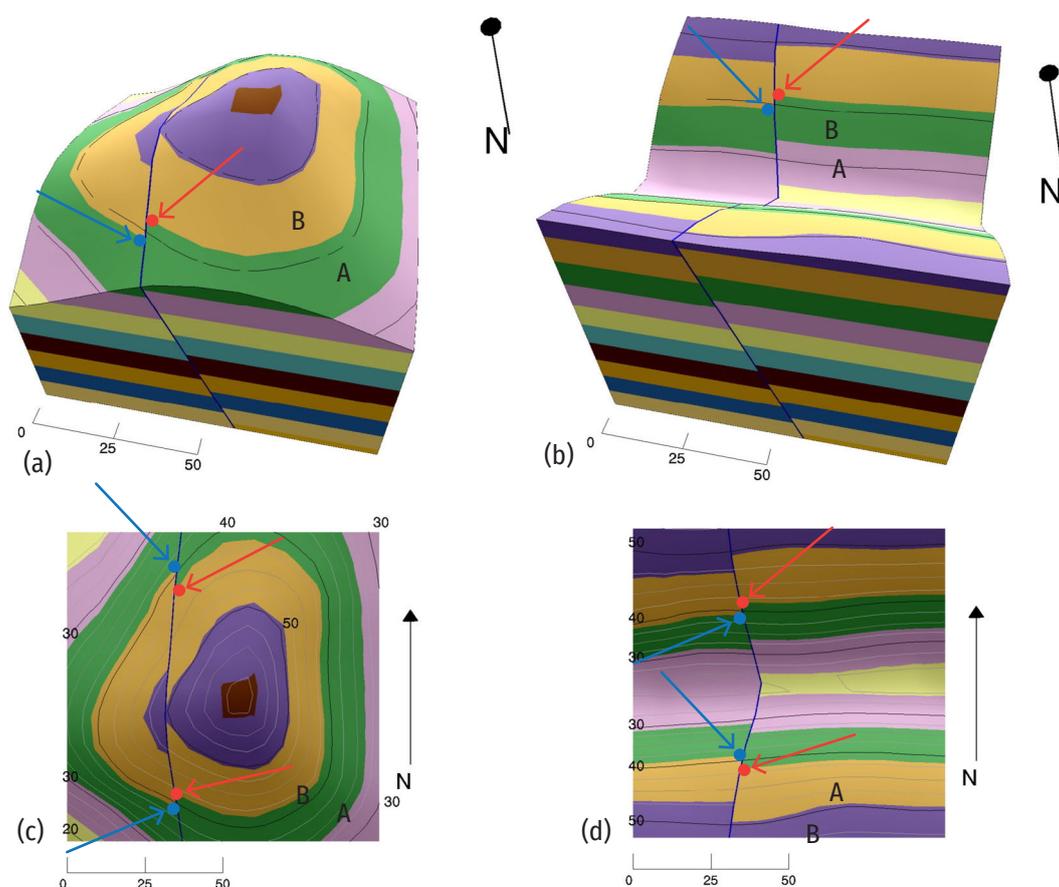


Figura 6.5 Faglia inversa immergente verso Est che taglia una successione orizzontale, in un'area con un rilievo. (b) Faglia inversa in un'area con una valle. (c,d) Carte geologiche relative. I punti rossi e blu indicano punti omologhi, cioè punti che prima dello spostamento legato all'attività della faglia si trovavano accanto, nella stessa posizione.

scorrente ma una faglia diretta, e l'apparente spostamento in carta dei punti è un effetto dell'intersezione tra la topografia e i contatti. Lo stesso può essere osservato nella carta geologica di Fig. 6.4d.

Riconoscimento di faglie inverse

Nel caso di faglie inverse (faglie in cui il tetto si alza rispetto al letto) tutti i contatti al tetto della faglia saranno ad una quota maggiore rispetto a i soliti contatti nell'area a letto della faglia. Vediamo questo nell'esempio di Fig. 6.5.

In Fig. 6.5a è raffigurata un'area in corrispondenza di un rilievo in cui è presente una faglia inversa immergente verso Est che taglia una successione stratigrafica orizzontale. Il punto rosso (indicato dalla freccia rossa) indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, al tetto della faglia, incontra la superficie di faglia. Il punto blu (indicato dalla freccia blu) indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, a letto della faglia, incontra la superficie di faglia. È chiaro dalla Fig. 6.5a che il punto rosso è a una quota maggiore rispetto al del punto blu, questo perché siamo in presenza di una faglia inversa. Questo è ben evidente anche nella relativa carta geologica di Fig. 6.5c.

La situazione nel caso di una faglia inversa in un'area con una valle è illustrata in Fig. 6.5b. Il punto rosso indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, al tetto della faglia, incontra la superficie di faglia. Il punto blu indica il punto dove il contatto tra la formazione A e la formazione B, a letto della faglia, incontra la superficie di faglia. Anche in questo caso è evidente che il punto rosso è a una quota maggiore rispetto al punto blu, questo perché siamo in presenza di una faglia diretta. Questo è osservabile anche nella relativa carta geologica di Fig. 6.5d.

Analogamente con quanto visto per le faglie dirette, nella carta geologica di Fig. 6.5c, se ci muoviamo lungo la superficie di faglia, i due punti sembrano dislocati con un movimento destrale a Nord del rilievo, mentre sembrano dislocati con movimento sinistrale a Sud del rilievo. Questa apparente incongruenza è legata al fatto che la faglia in questione non è una faglia trascorrente ma una faglia inversa, e l'apparente spostamento in carta dei punti è un effetto dell'intersezione tra la topografia e i contatti. Lo stesso può essere osservato nella carta geologica di Fig. 6.5d.

Riconoscimento di faglie trascorrenti

Nel caso di faglie trascorrenti (faglie verticali o subverticali con movimento orizzontale dei due blocchi) tutti i contatti da un lato della faglia saranno spostati nel solito senso (destrale o sinistrale) e della stessa entità. Vediamo questo nell'esempio di Fig. 6.6.

La Fig. 6.6a e la Fig. 6.6b mostrano una faglia trascorrente in una zona con un rilievo e in una zona con una valle, rispettivamente. Nelle relative carte geologiche (Fig. 6.6c,d) la faglia ha un andamento rettilineo, essendo verticale. In entrambe le carte geologiche il punto blu è spostato verso destra rispetto al punto rosso, e lo stesso accade per tutti gli altri contatti, cioè la faglia in entrambi i casi si è mossa con un movimento destrale. Si noti che questo spostamento destrale dei contatti, a differenza di quanto osservato per le faglie dirette e inverse, è osservabile in entrambi i versanti del rilievo e in entrambi i versanti della valle. Ovviamente dalla sola osservazione delle carte in Fig. 6.6c,d non è possibile stabilire se la faglia è una faglia trascorrente "ideale" con movimento relativo dei due blocchi perfettamente orizzontale, oppure se in movimento ha anche una componente verticale del rigetto. Per stabilire questo servono informazioni su strie presenti sulla superficie di faglia, indicatori cinematici, ecc.

6.2.2 Rigetto di una faglia

Il rigetto di una faglia, cioè la reale entità e direzione di movimento lungo una faglia, può essere ricavato da una carta geologica se:

- a) sono presenti in carta elementi lineari dislocati;
- b) sono presenti strutture planari dislocate, ed inoltre si hanno informazioni sulla direzione di movimento.

se

Presenza di strutture lineari

Determinare rigetto lungo una faglia è possibile se è possibile riconoscere, sulla carta, due oggetti o strutture geologiche che prima della deformazione si trovavano a diretto contatto e che ora invece si trovano ad una certa distanza l'uno dall'altro dalle due parti opposte della superficie di faglia. Oggetti o strutture di questo tipo non sono molto diffusi

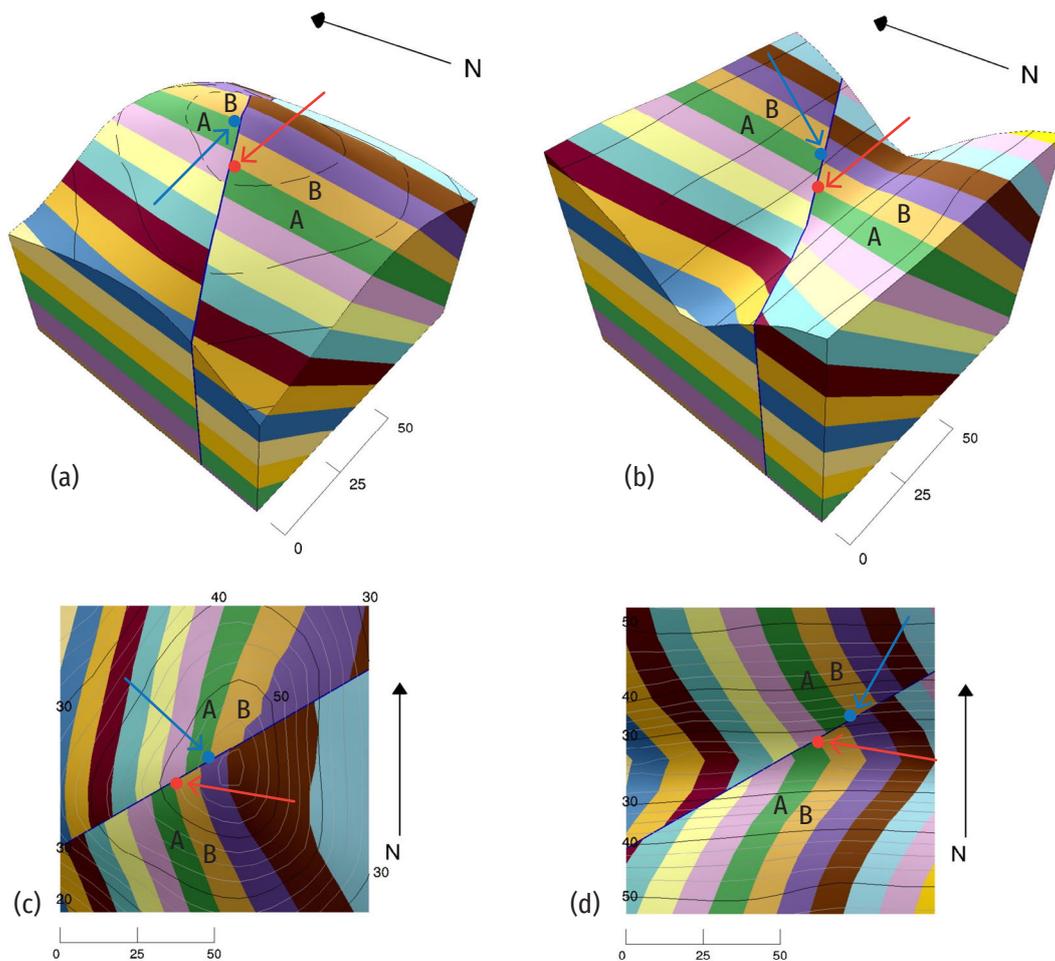


Figura 6.6 Faglia trascorrente con direzione NE-SW che taglia una successione orizzontale, in un'area con un rilievo. (b) Faglia trascorrente in un'area con una valle. (c,d) Carte geologiche relative. I punti rossi e blu indicano punti omologhi, cioè punti che prima dello spostamento legato all'attività della faglia si trovavano accanto, nella stessa posizione.

nelle carte geologiche in quanto sono necessari elementi lineari quali cerniere di pieghe, intersezioni tra due superfici, intersezione tra una superficie e una discordanza, ecc. Usuali strutture planari quali stratificazione o contatti tettonici non sono adatti, da soli, a fornirci questo tipo di informazioni.

La Fig. 6.7 mostra due esempi di elementi lineari dislocati da una faglia, è evidente che i punti x e x' , ora distanti, prima del movimento lungo la faglia erano a contatto. Se è possibile determinare la distanza tra x e x' è determinato in modo univoco lo spostamento lungo la superficie di faglia.

L'entità dello spostamento lungo la superficie di faglia è il *rigetto* della faglia.

Presenza di strutture planari

Quando in una carta geologica è presente una faglia che taglia e disloca una struttura planare (es. faglia che taglia un contatto stratigrafico, un sovrascorrimento, un filone, ecc.) se vogliamo ricavare il rigetto della faglia dobbiamo avere un'informazione in più rispetto a quanto visto nel capitolo precedente, in questo caso dobbiamo conoscere anche

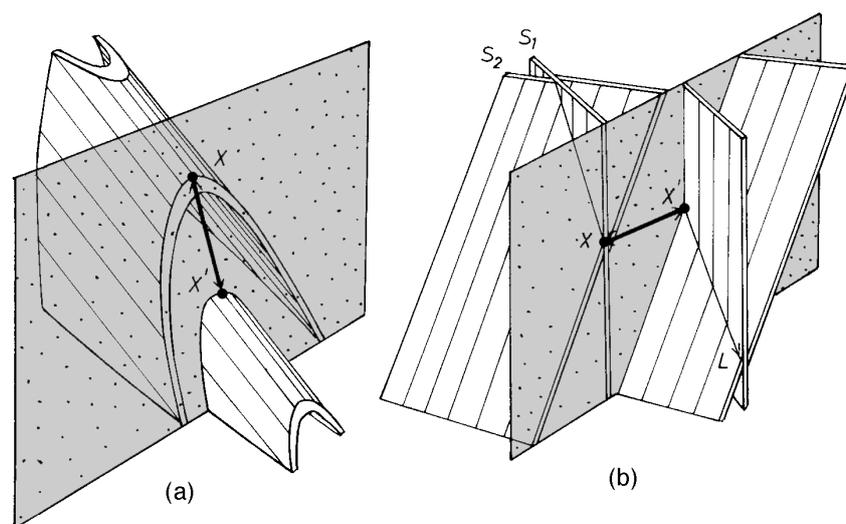


Figura 6.7 Casi in cui è possibile calcolare il rigetto, cioè il reale movimento lungo una faglia (la superficie di faglia è indicata in grigio). (a) Cerniera di una piega dislocata da una faglia. (b) Dislocazione di una linea (L) data dall'intersezione di due superfici (S_1 e S_2). La distanza $x - x'$ è il rigetto della faglia.

la direzione di movimento dei due blocchi, come dedotto dalla presenza di strie, lineazioni o altri indicatori cinematici, informazione che se nota viene di solito riportata in carta con uno specifico simbolo.

Quando in una carta geologica è presente una faglia che disloca una struttura planare e si conosce la direzione di movimento lungo la faglia (Fig. 6.8) è possibile realizzare una sezione geologica che contiene la direzione di movimento ed è quindi possibile ricavare:

- il *rigetto*, cioè il reale spostamento dei due blocchi (la distanza xx' in Fig. 6.8a e Fig. 6.8b);
- il *rigetto orizzontale*, cioè la componente orizzontale del rigetto lungo la direzione di movimento (Fig. 6.8b);
- il *rigetto verticale*, cioè la componente verticale del rigetto lungo la direzione di movimento (Fig. 6.8b);

Se invece non si conosce la direzione di movimento lungo la faglia, è possibile realizzare una sezione geologica ortogonale alla superficie di faglia (Fig. 6.8c) sulla quale è possibile ricavare:

- il *rigetto apparente*, cioè l'entità dello spostamento dei due blocchi come osservabile in sezione;
- il *rigetto orizzontale apparente* (ingl. *heave*), cioè la componente orizzontale del rigetto apparente come osservabile in sezione;
- il *rigetto verticale apparente* (ingl. *throw*), cioè la componente verticale del rigetto apparente come osservabile in sezione.

Un movimento lungo una faglia porta in ogni caso ad uno spostamento dei contatti nella carta geologica, come schematizzato in Fig. 6.8d. In carta è possibile misurare uno *spostamento orizzontale*, che però non ha alcuna relazione con il rigetto della faglia. In alcuni casi si può avere uno spostamento orizzontale (destrale o sinistrale) in carta dei contatti, anche nel caso di una faglia diretta senza alcuna componente di movimento trascorrente.

Nel caso di sovrascorrimenti regionali, cioè con estensione di parecchie decine o centinaia di km, può essere impossibile in una carta geologica riconoscere una struttura geologica

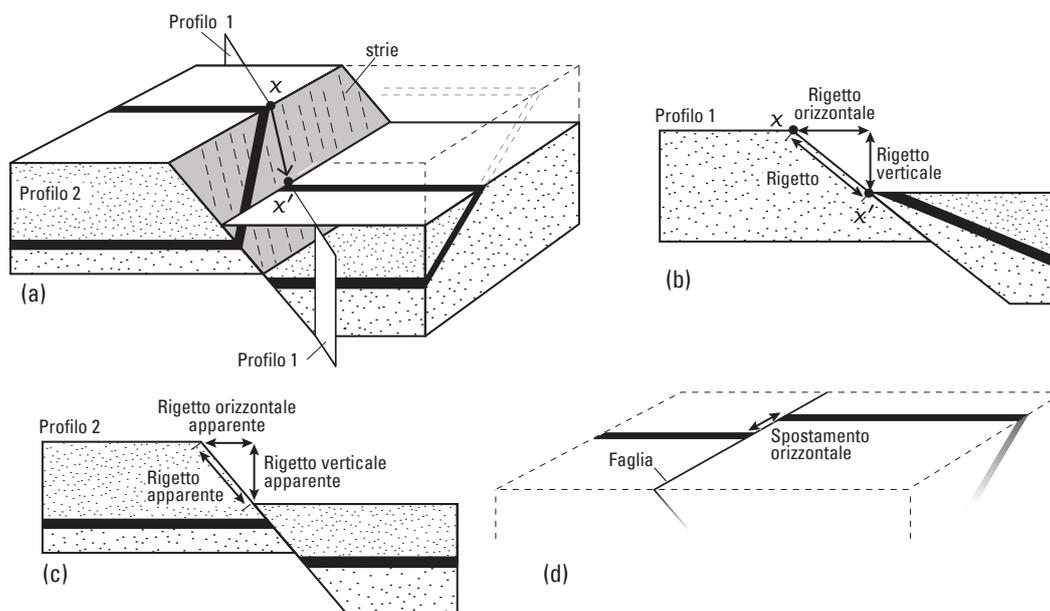


Figura 6.8 (a) Schema di una faglia normale (in grigio) che disloca uno strato (in nero). Sulla superficie di faglia sono indicate le strie (a tratteggio) che indicano la direzione di movimento sul piano di faglia. (b) Sezione lungo il Profilo 1, che contiene la direzione di movimento della faglia. (c) Sezione lungo il Profilo 2, orientato ortogonalmente rispetto alla direzione del piano di faglia. (d) Spostamento orizzontale in carta, lungo la faglia, dello strato inclinato.

che è stata dislocata dal sovrascorrimento, ma invece può essere possibile da osservazioni di campagna (indicatori cinematici) stabilire la direzione e senso di movimento del sovrascorrimento. In questi casi è possibile fare una stima “minima” dello spostamento, questa distanza (distanza A in Fig. 6.9) è la distanza misurata parallelamente alla direzione di movimento del sovrascorrimento che intercorre tra il punto più “interno” di affioramento della successione autoctona (punto 1 in Fig. 6.9) e il punto più “esterno” raggiunto dalla successione alloctona (punto 1' in Fig. 6.9).

6.3 Pieghie

6.3.1 Riconoscimento di pieghe

In una carta geologica pieghe sono evidenziate da variazioni giacitura della stratificazione (o della foliazione) varia e descrive delle strutture concave verso l'alto (sinformi) o verso il basso (antiformi), in cui possono affiorare rocce più giovani di quelle circostanti (sinclinali) o più antiche (anticlinali). Nella carta strutture antiformi e sinformi sono facilmente riconoscibili quando le pieghe hanno asse inclinato (Fig. 6.10a) piuttosto che quando hanno asse orizzontale (Fig. 6.10b), lo stesso vale per le anticlinali e le sinclinali (Fig. 6.10c e Fig. 6.10d). Non è detto che tutte le anticlinali siano antiformi (e viceversa) e che tutte le sinclinali siano sinformi (e viceversa). Nel caso di pieghe ripiegate, affioramenti nei due fianchi di una piega di prima fase possono dare pieghe di seconda fase che possono essere delle sinclinali sinformi in un fianco e anticlinali sinformi nell'altro fianco (Fig. 6.10e).

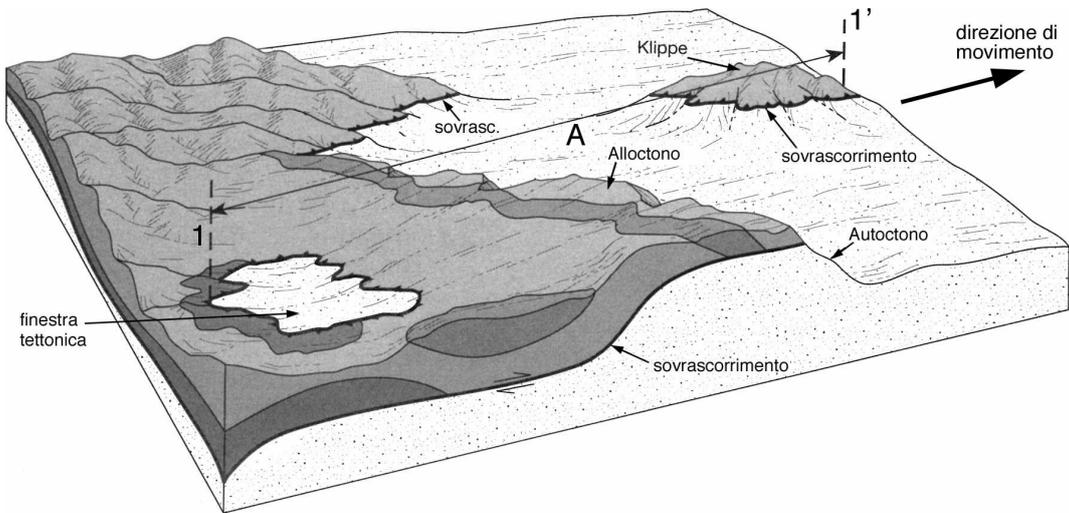


Figura 6.9 Stima dello spostamento minimo lungo un sovrascorrimento. La distanza A è l'entità minima dello spostamento lungo il sovrascorrimento.

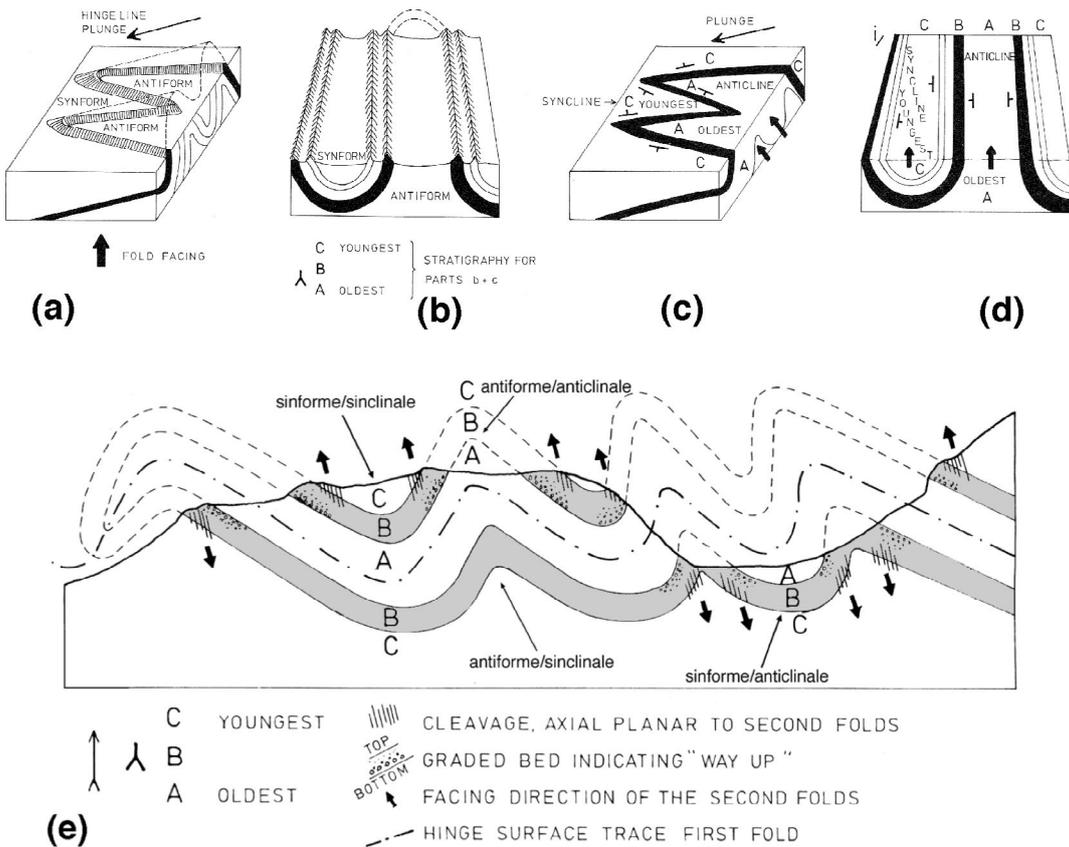


Figura 6.10 (a) Affioramenti di antiformi e sinformi con asse inclinato. (b) Antiformi e sinformi con asse orizzontale). (c) Affioramenti di anticlinali e sinclinali con asse inclinato. (d) Anticlinali e sinclinali con asse orizzontale. (e) Sinclinali sinformi e anticlinali sinformi su due fianchi di una piega.

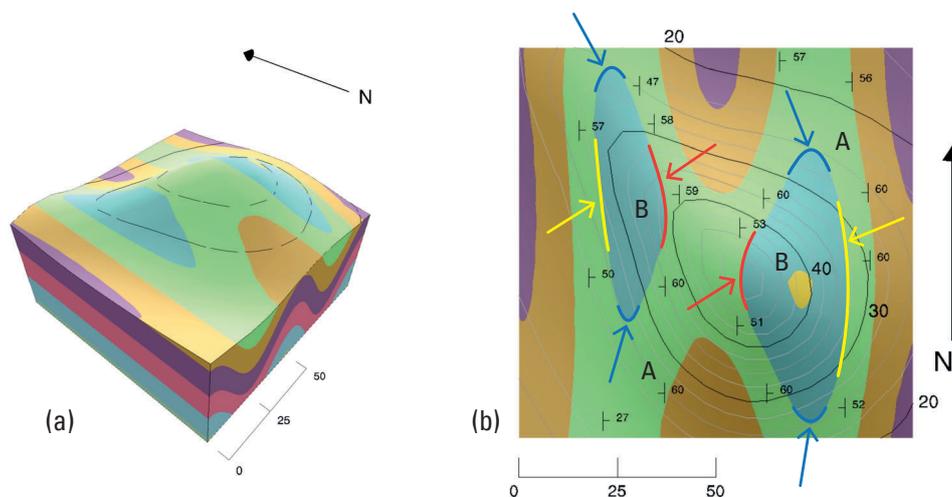


Figura 6.11 (a) Sistema di pieghe in un'area con un rilievo. (b) Carta geologica della solita area.

6.3.2 Pieghe in carta

Sulla base di quanto visto nei capitoli precedenti è possibile determinare la geometria di strutture a pieghe mediante l'analisi dell'andamento dei contatti in una carta geologica. Quando l'andamento sinuoso che solitamente ha un contatto in una carta geologica non è dovuto all'andamento della topografia, allora significa che siamo in presenza di una piega.

Questo concetto è illustrato in Fig. 6.11. In Fig. 6.11a è uno schema tridimensionale di un sistema di pieghe con piano assiale verticale e asse orizzontale con orientazione Nord-Sud. In Fig. 6.11b è rappresentata una carta geologica della solita area. Se osserviamo l'andamento dei contatti tra la formazione A (verde chiaro) e la formazione B (verde scuro), si vede che questi hanno un'andamento sinuoso in carta e in particolare:

- nelle porzioni di contatto indicate in giallo il contatto ha un'immersione e inclinazione costante, è a reggipoggio e la concavità è rivolta verso le quote maggiori (verso la formazione sovrastante); in questi casi l'andamento del contatto in carta è influenzato solo dall'intersezione del contatto con la topografia;
- nelle porzioni di contatto indicate in rosso il contatto ha un'immersione e inclinazione costante, è a franapoggio con un'inclinazione più inclinata del pendio e la concavità è rivolta verso le quote minori (verso la formazione sovrastante); anche in questi casi l'andamento del contatto in carta è influenzato solo dall'intersezione del contatto con la topografia;
- per quanto riguarda le porzioni di contatto indicate in blu, la curvatura non può essere imputabile alla topografia, quindi questo andamento deve essere necessariamente legato alla presenza di cerniere di pieghe.

È importante notare che l'andamento dei contatti in una carta geologica in cui sono presenti delle pieghe è influenzato ovviamente dall'andamento della superficie topografica (presenza di valli, rilievi, ecc.) ma soprattutto dall'orientazione dei piani assiali e degli assi delle pieghe rispetto alla topografia. Vediamo questo con gli esempi di Fig. 6.12.

In Fig. 6.12a sono riportate delle anticlinali e sinclinali con piano assiale verticale e assi con orientazione Nord-Sud, gli assi sono quindi ortogonali all'orientazione dei due versanti della valle, che hanno andamento Est-Ovest. Sulla superficie topografica si possono facilmente riconoscere le pieghe, le varie cerniere ed inoltre l'andamento dei contatti

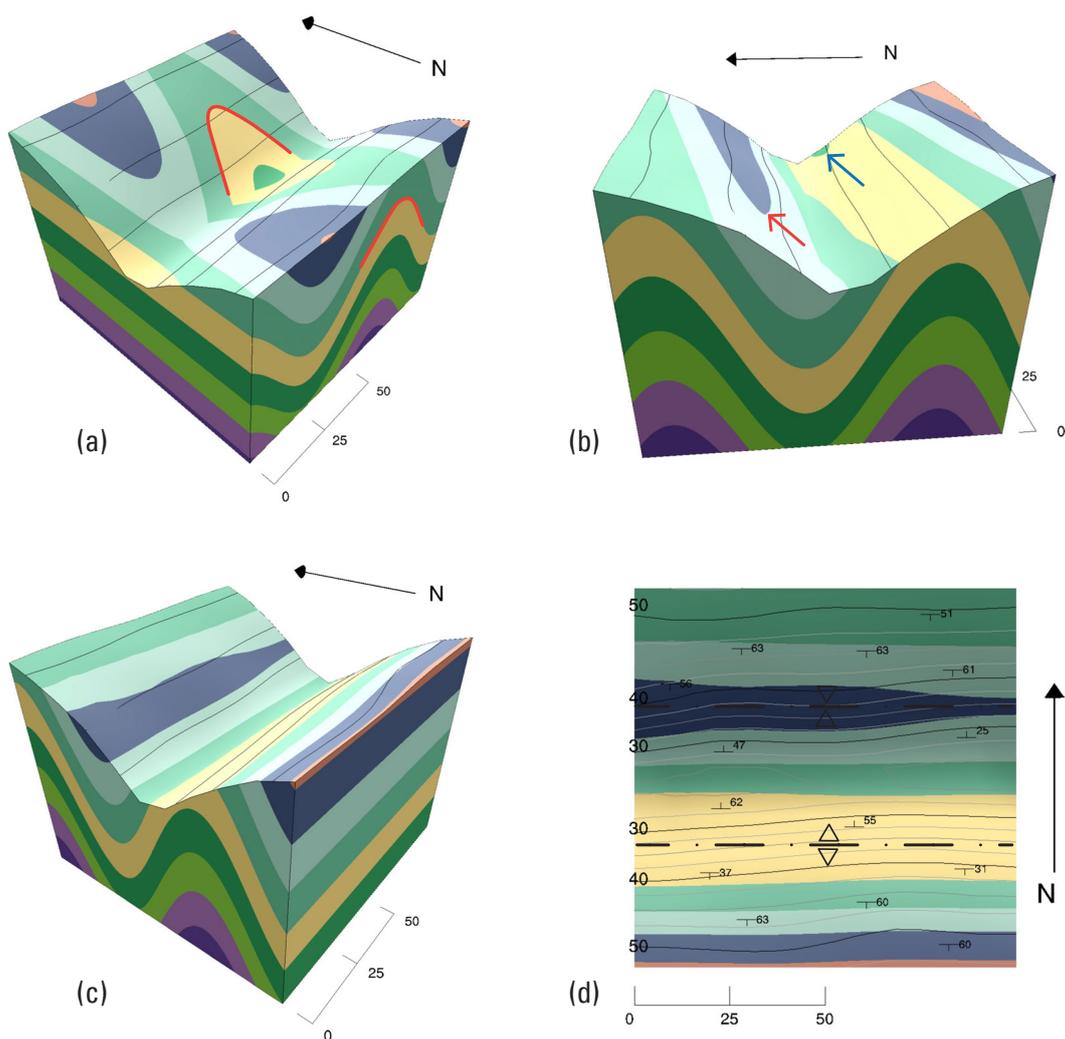


Figura 6.12 (a) Pieghe con piano assiale verticale e asse ortogonale all'andamento dei versanti. (b) Pieghe con piano assiale verticale e asse immergente verso N80E con un'inclinazione di 5°. (c) Pieghe con piano assiale verticale e asse orizzontale, con orientazione Est-Ovest. (d) Carta geologica per le pieghe in (c).

rispecchia abbastanza fedelmente la vera geometria delle pieghe, come evidenziato per il contatto indicato in rosso.

In Fig. 6.12b le pieghe hanno sempre il piano assiale verticale, ma in questo caso l'asse immerge verso N80E con un'inclinazione di 5°, cioè l'asse è circa parallelo ai versanti della valle. Con questa orientazione sarà molto difficile riconoscere le pieghe sul versante e nell'esempio solo due cerniere, indicate dalle frecce rosse e blu, sono visibili. L'andamento dei contatti sul versante inoltre non è rappresentativo della geometria delle pieghe, la cerniera indicata dalla freccia rossa sembra essere infatti la cerniera di una piega isoclinale (cioè con i fianchi paralleli), ma invece le pieghe nell'area hanno una geometria aperta.

Nel caso di pieghe con assi paralleli al versante, come rappresentato in Fig. 6.12c, nessuna cerniera sarà osservabile e ciò potrebbe portare alla errata interpretazione che nell'area non esiste alcuna struttura a pieghe. In questi casi la presenza di cerniere e la posizione dei piani assiali delle pieghe può essere stabilita solo se si hanno informazioni sulla giacitura della stratificazione nell'area, cioè se sono state raccolte delle misure di

stratificazione, come rappresentato in Fig. 6.12d.

Vediamo ora alcuni di sistemi di pieghe in carta, inizialmente nel caso più semplice di un sistema di anticlinali e sinclinali Fig. 6.13 con piano assiale verticale e asse orizzontale.

In Fig. 6.13a è riportato uno schema tridimensionale di una serie di anticlinali e sinclinali, con piano assiale verticale e asse orizzontale, con direzione N-S. In Fig. 6.13b sono riportate le solite strutture, in un'area in cui è presente una valle, la relativa carta geologica è riportata in Fig. 6.13d. In entrambe le figure si vede come i contatti abbiano un andamento sinuoso e i loro punti di massima curvatura (indicati dai punti in rosso e blu) rappresentino le cerniere della piega. La linea che unisce tutti i punti è la traccia del piano assiale della piega. Dalla Fig. 6.13d è evidente che:

- a) in carta tutti i punti sono allineati, ciò indica che i piani assiali sono verticali;
- b) i punti che, nei versanti opposti della valle, rappresentano le cerniere del solito contatto (es il punto A e A', ecc.), sono alla solita quota, questo indica che le pieghe hanno asse orizzontale.

Le solite considerazioni sono ovviamente valide anche nel caso di un'area in cui è presente un rilievo (Fig. 6.13c), come osservabile nella relativa carta geologica (Fig. 6.13e)

Vediamo ora le geometrie nel caso di pieghe con piano assiale inclinato e asse orizzontale.

In Fig. 6.14a è riportato uno schema tridimensionale con una serie di anticlinali e sinclinali, con asse orizzontale (direzione N-S), mentre per tutte le pieghe il piano assiale immerge verso Est con una inclinazione di 60°. In Fig. 6.14b sono riportate le solite strutture, in un'area in cui è presente una valle, la relativa carta geologica è riportata in Fig. 6.14d. In entrambe le figure si vede come i contatti abbiano un andamento sinuoso e i loro punti di massima curvatura (indicati dai punti in rosso e blu) rappresentino le cerniere della piega. La linea che unisce tutti i punti è la traccia del piano assiale della piega. Dalla Fig. 6.14d è evidente che:

- a) in carta tutti i punti non sono allineati, ma la linea che li unisce, cioè la traccia del piano assiale, nella valle ha la forma di una "v" con la punta verso Est, questo indica che i piani assiali sono inclinati verso Est;
- b) i punti che, nei versanti opposti della valle, rappresentano le cerniere del solito contatto (es il punto A e A', ecc.), sono alla solita quota, questo indica che le pieghe hanno asse orizzontale.

Esaminiamo infine il caso in cui le pieghe hanno piani assiali verticali e assi inclinati.

In Fig. 6.15a è riportato uno schema tridimensionale con una serie di anticlinali e sinclinali, con piano assiale verticale e asse immergente verso Nord con un'inclinazione di 8°. Come nei casi precedenti, in Fig. 6.15b sono riportate le solite strutture, in un'area in cui è presente una valle, la relativa carta geologica è riportata in Fig. 6.15d, mentre in Fig. 6.15c sono rappresentate le solite strutture in un'area con un rilievo e in Fig. 6.15e è riportata la relativa carta geologica. In questo caso l'andamento dei piani assiali in carta è simile a quello di Fig. 6.13d,e (i piani assiali sono verticali in entrambi i casi). È interessante invece notare che in Fig. 6.15d i punti che rappresentano la solita cerniera nei due versanti della valle si trovano a quote differenti, cioè il punto A' è a una quota minore dell'omologo punto A e lo stesso il punto B' è a una quota più bassa rispetto al punto B. Questa diminuzione della quota, andando da Sud verso Nord, ci indica che l'asse delle pieghe immerge verso Nord. Questa differenza di quota tra cerniere omologhe è evidente anche nel caso di una morfologia con un rilievo (Fig. 6.15c,d).

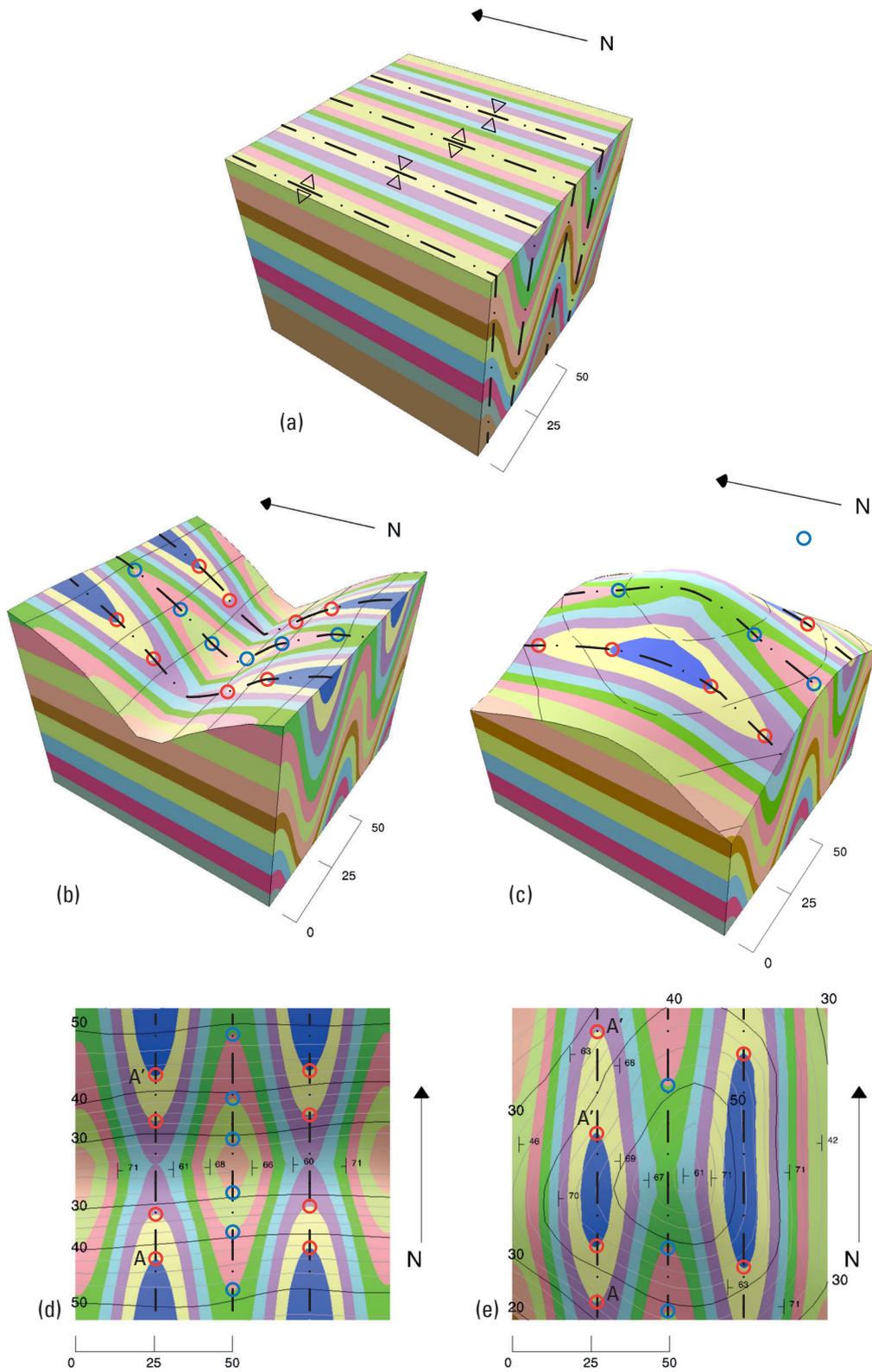


Figura 6.13 Andamento di contatti nel caso di anticlinali e sinclinali a piano assiale verticale e asse orizzontale, a tratto e punto sono indicate le tracce dei piani assiali.

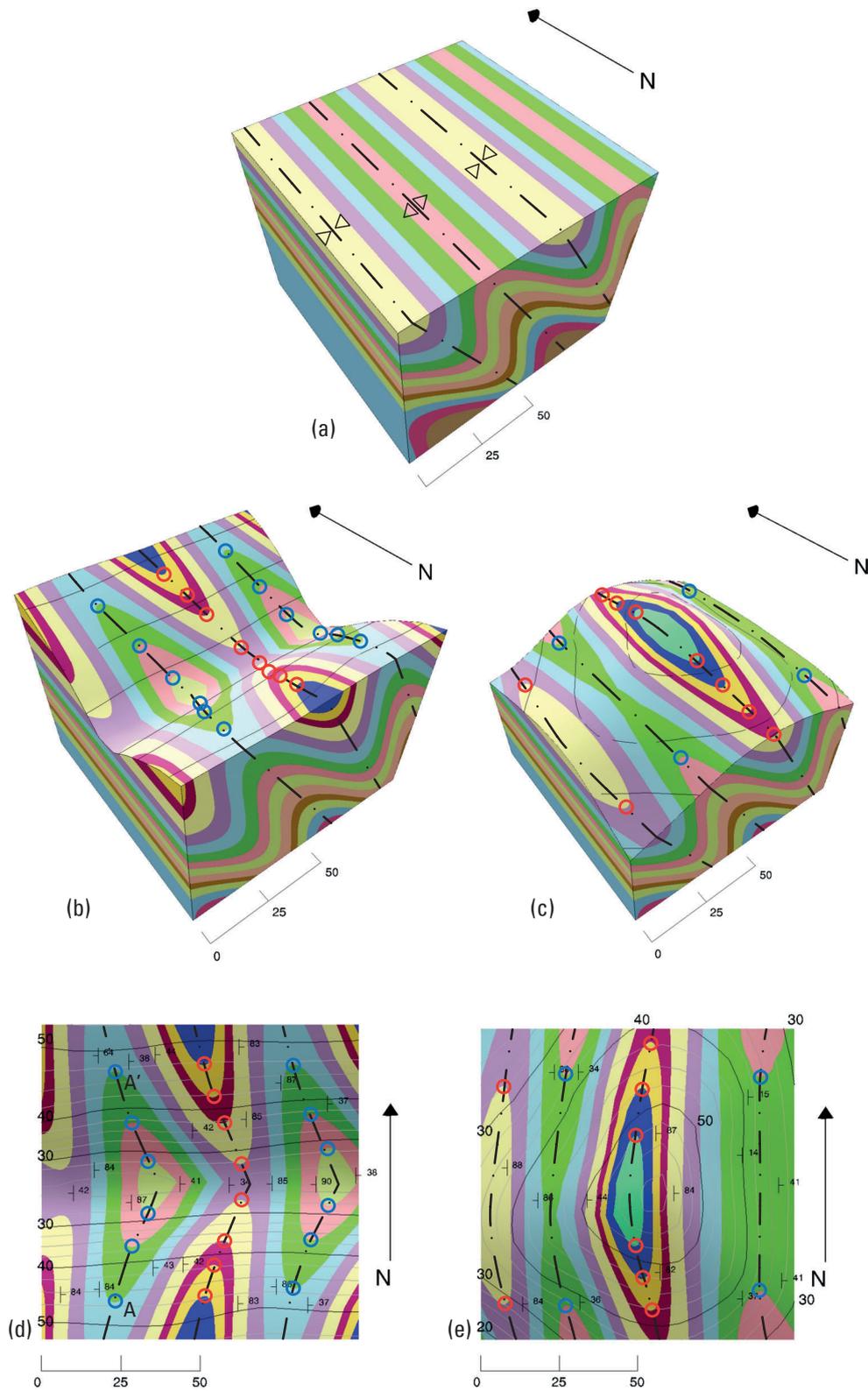


Figura 6.14 Andamento di contatti nel caso di anticlinali e sinclinali con piano assiale immergente verso Est con un'inclinazione di 60° e asse orizzontale, a tratto e punto sono indicate le tracce dei piani assiali.

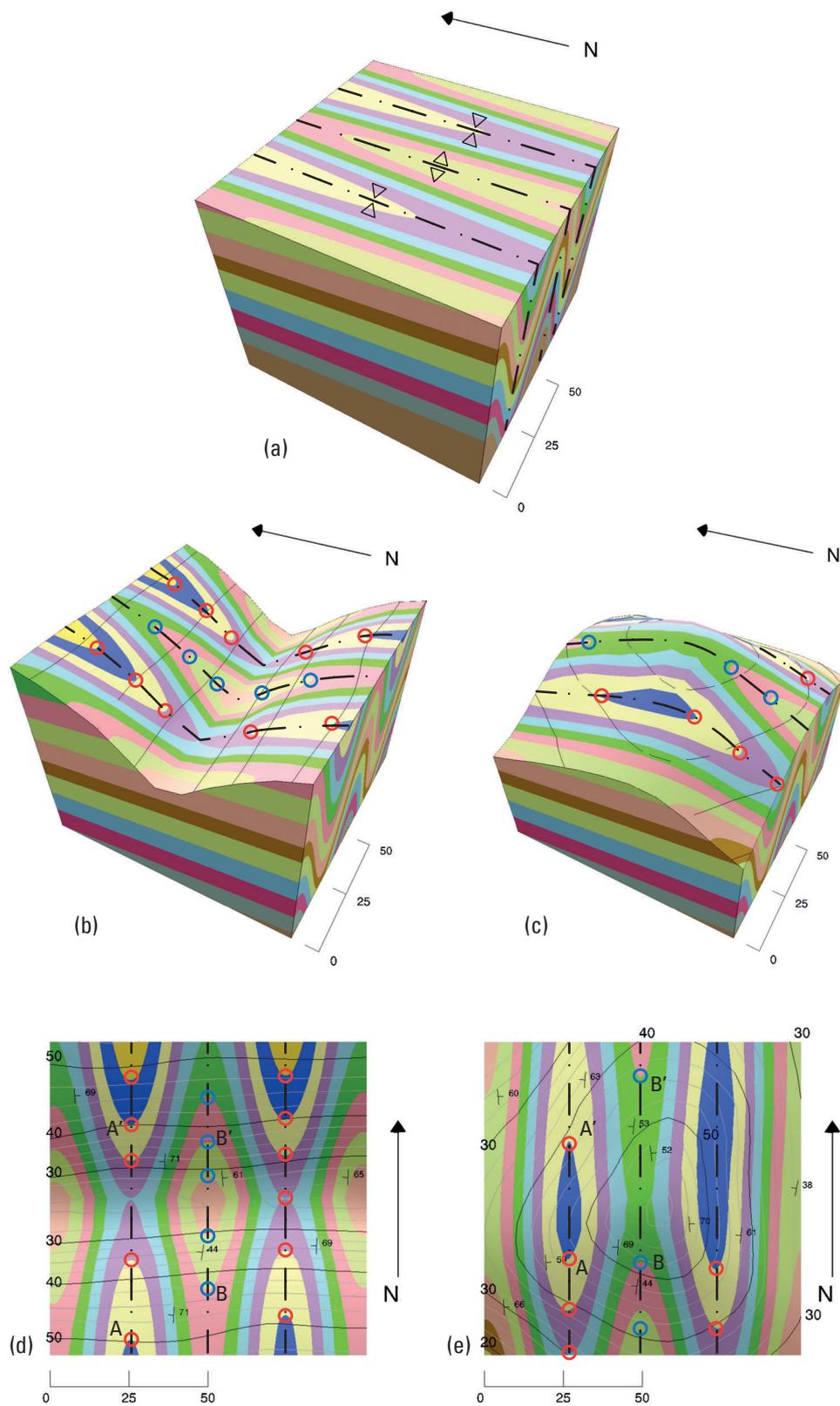


Figura 6.15 Andamento di contatti nel caso di anticlinali e sinclinali con piano assiale verticale e asse immergente verso Nord con un'inclinazione di 8° , a tratto e punto sono indicate le tracce dei piani assiali.

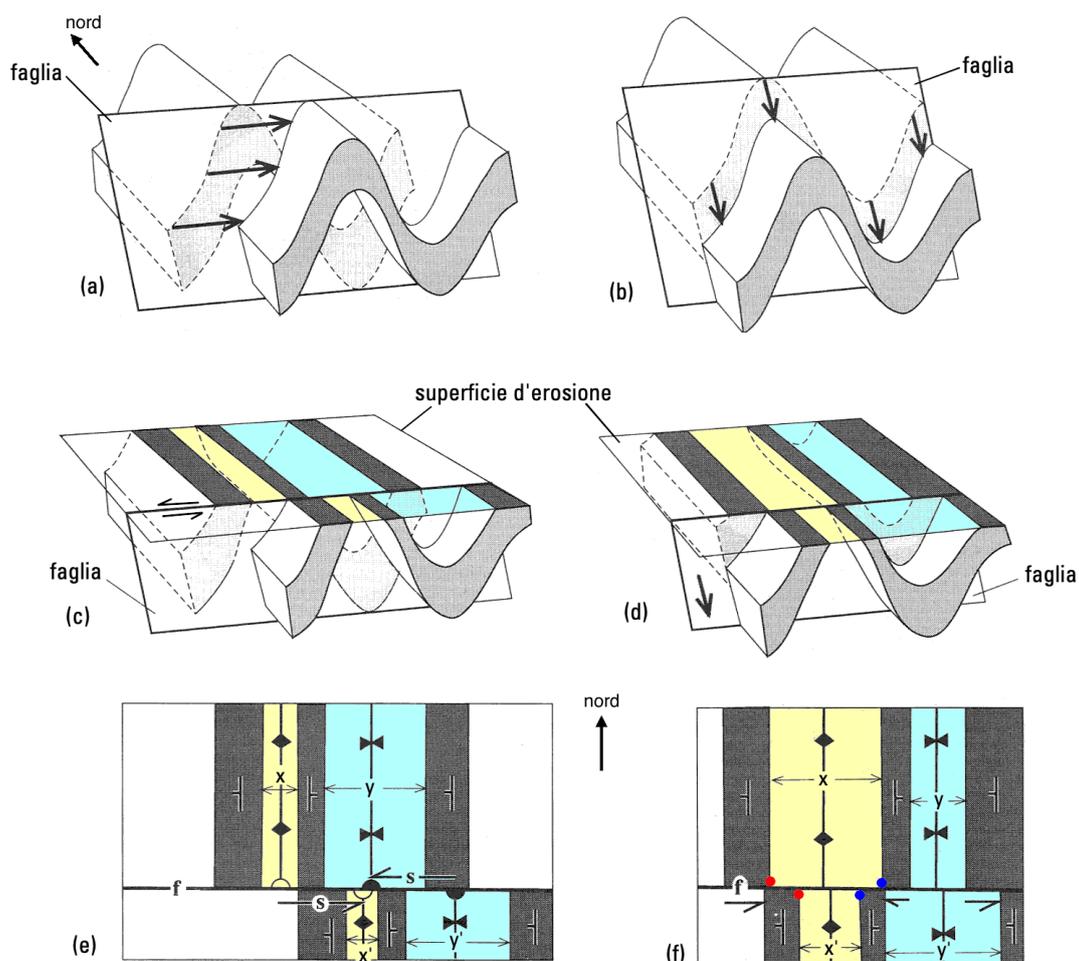


Figura 6.16 (a) Schema di una anticlinale e una sinclinale tagliate da una faglia trascorrente. (b) Anticlinale e sinclinale tagliate da una faglia diretta. Le frecce indicano il movimento lungo la faglia. (c,d) Affioramenti risultanti dall'erosione dei due modelli precedenti su una superficie orizzontale. In giallo è indicata l'estensione del nucleo dell'anticlinale, all'interno dello strato in nero, in celeste è indicato il nucleo della sinclinale. (e,f) Carte geologiche schematiche delle due strutture, nel caso di topografia orizzontale.

6.4 Sovrapposizione di pieghe e faglie

In aree in cui sono presenti sia faglie che pieghe è molto probabile che ci sia una loro sovrapposizione, cioè che alcune faglie siano posteriori al piegamento e che quindi le faglie taglino le pieghe. La sovrapposizione di una faglia ad una piega provoca la dislocazione della cerniera della piega, come già illustrato in Fig. 6.7a. La semplice analisi di una carta geologica in cui è presente una piega tagliata da una faglia può fornirci informazioni, sebbene qualitative, sul movimento della faglia.

In Fig. 6.16 sono raffigurate delle pieghe, una anticlinale e una sinclinale, entrambe con piano assiale verticale, tagliate da una faglia. Nel primo caso (Fig. 6.16a) le pieghe sono tagliate da una faglia trascorrente, nel secondo caso (Fig. 6.16b) le pieghe sono tagliate da una faglia diretta. Se tagliamo orizzontalmente i due modelli (erosione orizzontale delle strutture) vengono messe in evidenza i nuclei delle anticlinali e delle sinclinali, come illustrato in Fig. 6.16c e in Fig. 6.16d. Le relative carte geologiche schematiche sono riportate in Fig. 6.16e e in Fig. 6.16f.

Nel caso di pieghe tagliate da una faglia trascorrente, alcune considerazioni sono possibili. L'erosione in questo caso espone a destra e a sinistra della faglia sempre il solito livello strutturale della piega (Fig. 6.16c). Questo implica che l'ampiezza degli affioramenti non cambia dalle due parti della faglia e che tutti i contatti e piani assiali sono dislocati nel solito modo, sinistro nel nostro caso e della solita entità. Questo è evidente in Fig. 6.16e: l'ampiezza nel nucleo dell'anticlinale (distanza x e x') rimane la stessa a Nord e a Sud della faglia, lo stesso per l'ampiezza del nucleo della sinclinale (distanza y e y'). Tutti i contatti e i piani assiali sono inoltre traslati verso sinistra della stessa entità, pari allo spostamento (rigetto) lungo la faglia. In altre parole, nel caso di una faglia trascorrente la carta geologica è la stessa nei due lati della faglia.

La cosa è più complicata quando si ha a che fare con pieghe tagliate da faglie dirette. In Fig. 6.16b è illustrato un modello tridimensionale con una anticlinale e una sinclinale tagliate da una faglia diretta. La faglia ha direzione Est-Ovest ed immerge verso Sud, è il blocco Sud che viene abbassato. Se tagliamo orizzontalmente questo modello (Fig. 6.16d) a Sud della faglia affiora il tetto, mentre a Nord affiora il letto della faglia. Dalla carta geologica schematica di Fig. 6.16f si vede come nel caso della anticlinale, a Sud della faglia (la parte ribassata) affiora ora un livello strutturale più superficiale di quello che invece affiora a Nord, questo implica che l'ampiezza del nucleo della anticlinale a Nord della faglia (distanza x) è maggiore della ampiezza del nucleo della anticlinale a Sud della faglia (distanza x'). Per la sinclinale si ha l'opposto: l'ampiezza del nucleo della sinclinale a Nord della faglia (distanza y) è maggiore della ampiezza del nucleo della sinclinale a Sud della faglia (distanza x'). Occorre inoltre notare, nel caso della Fig. 6.16f, che in carta alcuni contatti sembreranno dislocati con un movimento sinistro, come per esempio i due punti in rosso (che prima dell'attività della faglia si trovavano adiacenti), mentre altri sembrano dislocati con movimento destro, come per i punti blu. Ovviamente lo spostamento di questi contatti è solo apparente ed è legato solamente al fatto che ai due lati della faglia affiorano due livelli strutturali diversi della piega.

Vediamo ora in maggior dettaglio come risultano spostati, in una carta geologica, i piani assiali delle pieghe quando vengono tagliati da una faglia diretta. In una faglia diretta si ha, per definizione, lo spostamento verso il basso del tetto della faglia, questo spostamento generalmente avviene lungo la linea di massima pendenza della faglia oppure può avvenire secondo un'altra direzione (movimento obliquo). Consideriamo qui il caso più comune, quello in cui il tetto della faglia si muove con movimento verticale secondo la linea di massima pendenza sul piano di faglia. Consideriamo questi tre casi:

- a) pieghe con piano assiale verticale e il vettore spostamento lungo la faglia è parallelo al piano assiale delle pieghe;
- b) pieghe con piano assiale verticale e il vettore spostamento lungo la faglia non è parallelo al piano assiale delle pieghe;
- c) pieghe con piano assiale inclinato.

La Fig. 6.17a mostra il caso di un sistema di pieghe con assi orizzontali e piani assiali verticali con direzione Nord-Sud. Queste pieghe sono tagliate da una faglia diretta con direzione Est-Ovest immergente verso Sud, il tetto della faglia si sposta esattamente verso Sud (N180), secondo la linea di massima pendenza lungo la faglia. In Fig. 6.17b è rappresentata la relativa carta geologica. Poiché i piani assiali hanno direzione Nord-Sud e lo spostamento lungo la faglia avviene verso Sud (cioè la direzione di spostamento è parallela ai piani assiali), in carta i piani assiali non appariranno spostati.

La Fig. 6.17c mostra il caso di un sistema di pieghe con assi orizzontali e piani assiali

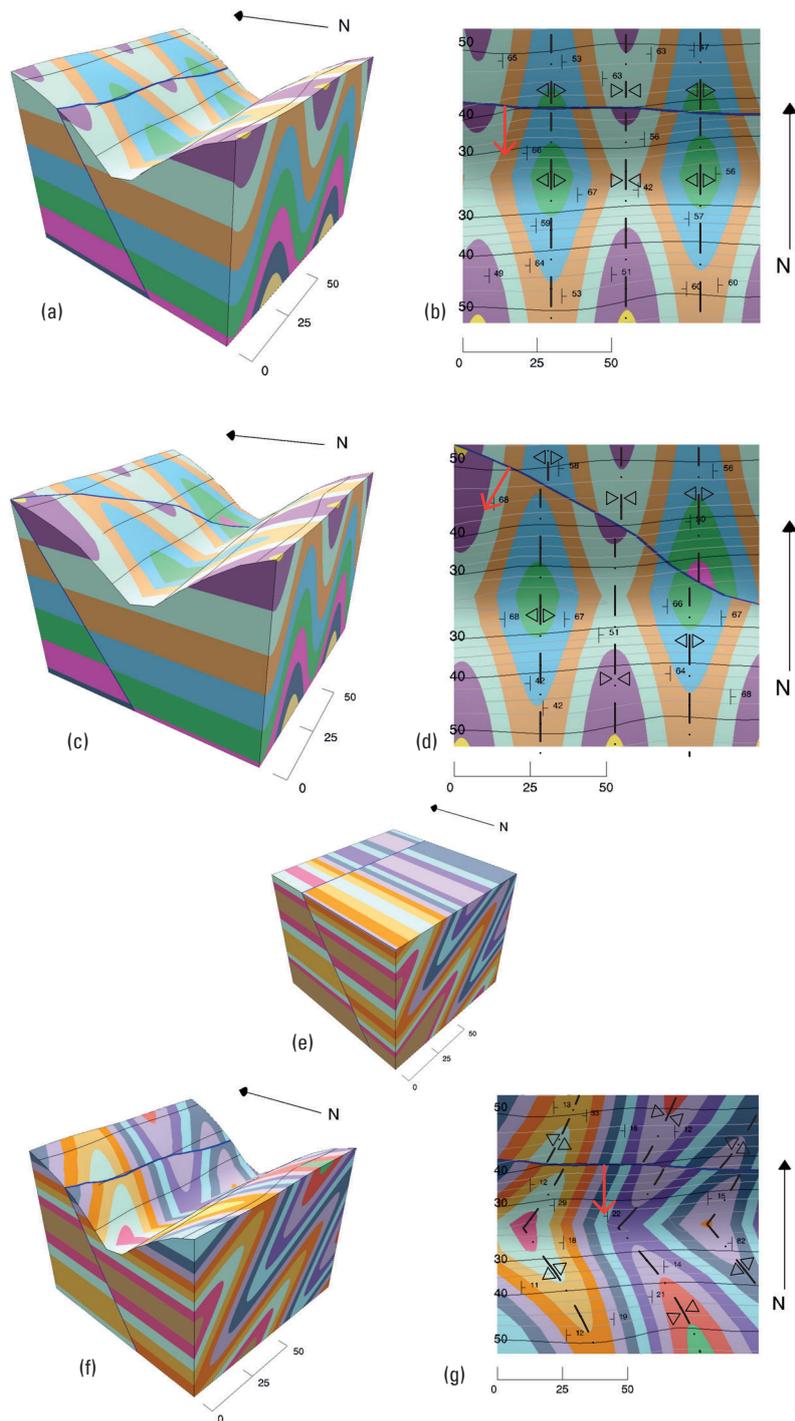


Figura 6.17 Modelli tridimensionali e carte geologiche di sistemi di pieghe tagliate da una faglia diretta. La freccia rossa nelle carte geologiche indica la direzione di movimento del tetto della faglia. (a,b) Le pieghe hanno piani assiali verticali con direzione Nord-Sud, la faglia ha esattamente direzione Est-Ovest e la direzione di movimento del tetto è esattamente verso Sud. (c,d) Le pieghe hanno piani assiali verticali con direzione Nord-Sud, la faglia ha direzione N120E e la direzione di movimento del tetto è verso N210E. (e,f,g) Le pieghe hanno piani assiali inclinati verso Est e assi con direzione Nord-Sud, la faglia ha esattamente direzione Est-Ovest e la direzione di movimento del tetto è verso Sud.

verticali con direzione Nord-Sud. Queste pieghe sono tagliate da una faglia diretta con direzione N120E, il tetto della faglia si sposta secondo la linea di massima pendenza lungo la faglia, cioè lungo la direzione N210. In Fig. 6.17d è rappresentata la relativa carta geologica. In questo caso la direzione di spostamento lungo la faglia (freccia rossa nella carta geologica) è obliqua rispetto ai piani assiali, questi quindi risulteranno spostati in carta a seguito del movimento lungo la faglia.

Nel caso di pieghe con piani assiali inclinati e tagliate da una faglia diretta (Fig. 6.17e,f,g), nella carta geologica i piani assiali risulteranno spostati in quanto la direzione di spostamento lungo la faglia non è parallela ai piani assiali delle pieghe.

Da questi tre esempi è possibile quindi stabilire, più in generale, che in una carta geologica i piani assiali di pieghe risulteranno in genere dislocati se tagliati da una faglia, non risulteranno dislocati solo nel caso in cui il vettore spostamento lungo la faglia sia parallelo ai piani assiali delle pieghe.

6.4.1 Pieghe in carta e in proiezione stereografica

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.

Le tecniche per ricavare informazioni sulla giacitura degli elementi di una piega da misure presenti in carta utilizzando le proiezioni stereografiche sono riportate nell'Appendice "Pieghe in proiezione stereografica" a pag. 105.

Depositi quaternari e intrusioni

7.1 Depositi quaternari

Nel rilevamento geologico e nella realizzazione di sezione geologiche attraverso depositi quaternari bisogna sempre tenere conto che i limiti tra le varie unità litostratigrafiche non sono necessariamente rappresentati da variazioni litologiche, ma morfologiche, e che le informazioni che vengono raccolte in superficie difficilmente sono estrapolabili in profondità.

Lungo un corso d'acqua le fasi erosive e fasi di deposizione portano alla formazione di terrazzi alluvionali a differente altezza rispetto al corso d'acqua attuale (Fig. 7.1). Questi depositi sono caratterizzati da una superficie suborizzontale e da una scarpata, alla base della quale è il contatto con il deposito più giovane (Fig. 7.1a). La differenza di quota tra i terrazzi non è assolutamente indicativa dello spessore del deposito, ma dall'entità del sollevamento ed erosione. Un esempio di sezione geologica in depositi alluvionali terrazzati è riportato in Fig. 7.1b e in Fig. 7.2.

Dal punto di vista geometrico l'andamento dei contatti geologici alla base dei depositi alluvionali quaternari o tra vari tipi di depositi non segue le regole esposte nel [Capitolo 2](#), in quanto questi depositi colmano vecchie morfologie e il contatto con le rocce sottostanti è determinato dalla morfologia del substrato preesistente. Un esempio dell'andamento particolare di questi contatti è illustrato in Fig. 7.3. Nella figura si vede che il contatto fra i depositi alluvionali e la roccia in posto penetra nella valle presentando una forma a "v" con una punta verso la roccia in posto. Questo non significa però che la formazione giace sopra alle alluvioni, è solo la morfologia che determina l'andamento del contatto.

7.2 Intrusioni

In caso di intrusioni (plutoni, stock, filoni, ecc.) il contatto tra il corpo magmatico intruso e le rocce incassanti generalmente ha in carta un andamento complesso, che però dipende solamente dalla geometria del contatto intrusivo (Fig. 7.4), quindi anche per questi tipi di contatti non si applica quanto visto nel [Capitolo 2](#). Talvolta il contatto in carta ha un andamento che potrebbe essere interpretato come dovuto a pieghe, ma è solo un effetto della natura intrusiva molto irregolare del contatto (Fig. 7.5). Con questi tipi di contatti si possono realizzare sezioni geologiche usando il metodo delle curve di livello ma, proprio per la natura intrusiva, è molto difficile estrapolare il l'andamento in profondità.

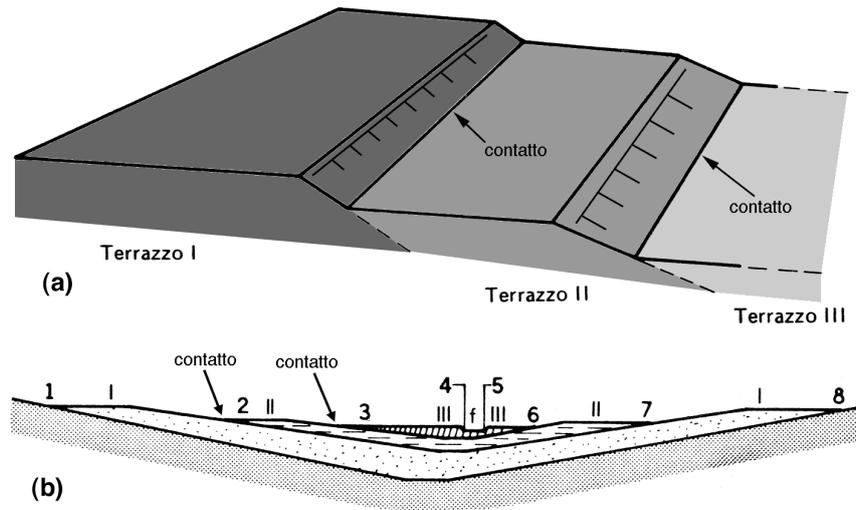


Figura 7.1 (a) Depositi alluvionali terrazzati. (b) Sezione geologica attraverso depositi alluvionali terrazzati. I vari ordini di terrazzi sono indicati da numeri romani (dal più vecchio al più recente), i numeri arabi indicano le varie scarpate.

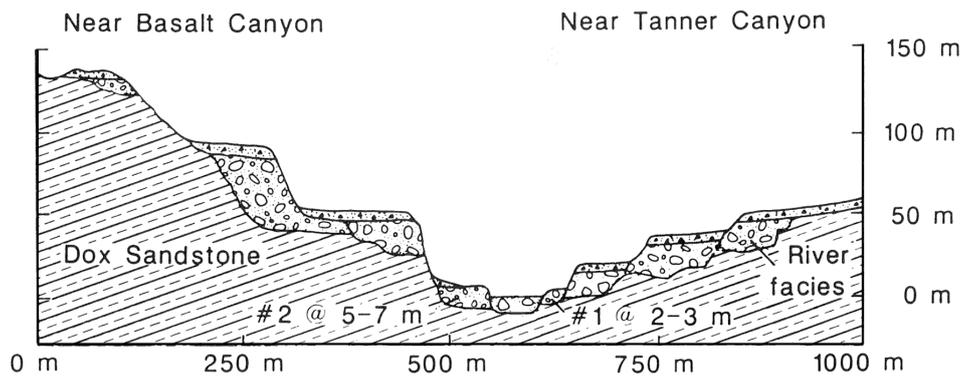


Figura 7.2 Sezione attraverso depositi alluvionali terrazzati.

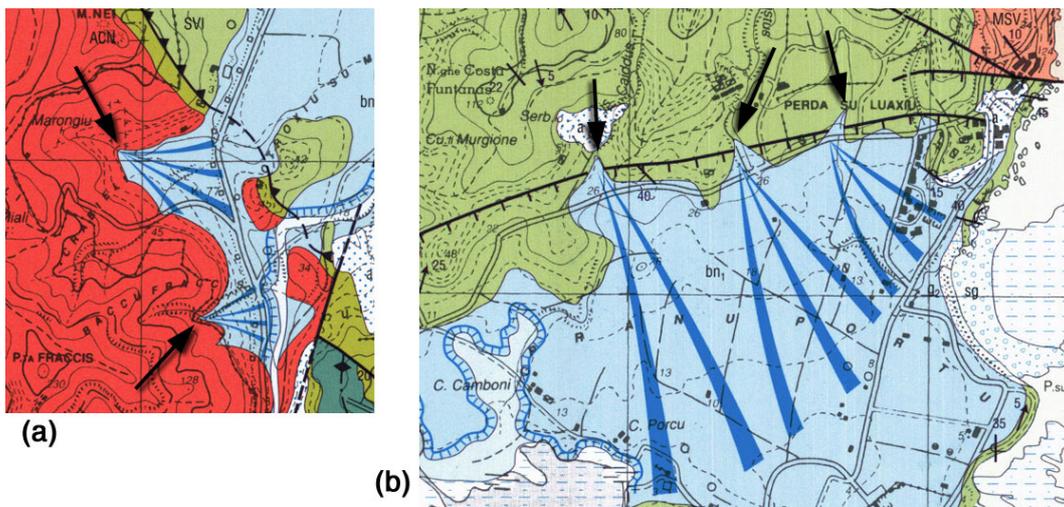


Figura 7.3 Porzioni di carte geologiche con riportati i contatti tra depositi alluvionali (bn1, celeste) e substrato roccioso.

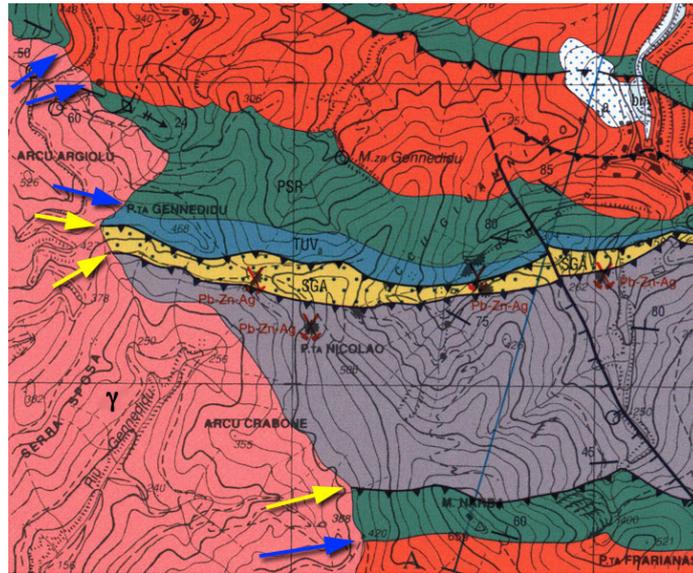


Figura 7.4 Contatto intrusivo tra un granito (γ, formazione in rosa) e altre formazioni. Il contatto intrusivo taglia vari contatti stratigrafici (frecche blu) e vari sovrascorrimenti (frecche gialle).

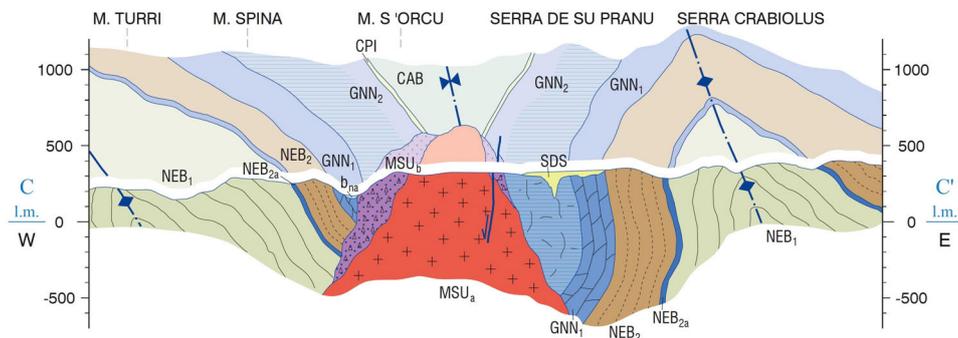
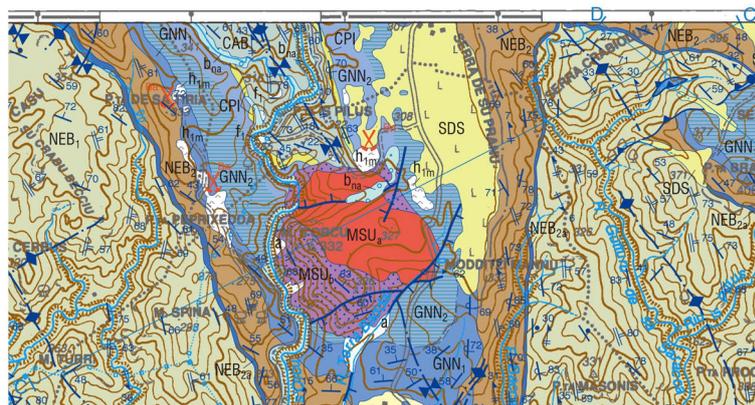


Figura 7.5 Carta geologica e relativa sezione geologica attraverso una intrusione granitica (da: https://www.isprambiente.gov.it/Media/carg/564_CARBONIA/Foglio.html). Il contatto del granito (MSU) con le rocce incassanti ha un andamento che potrebbe ricordare quella di un'antiforme, ma in realtà questa forma è solamente la forma originaria dell'intrusione

8

Sezioni geologiche

8.1 Introduzione

Nel [Capitolo 4](#) abbiamo visto come realizzare semplici sezioni geologiche utilizzando il Metodo delle curve di livello, questo metodo è semplice e dovrebbe essere usato ogni qual volta sia possibile. Purtroppo questo metodo può essere usato solo quando le superfici geologiche sono delle superfici piane, quando siamo in presenza di pieghe cilindriche con asse orizzontale, ed inoltre ci dobbiamo trovare in un'area in cui i contatti tagliano le solite isoipse nei lati opposti di una valle o di un rilievo, come illustrato in [Fig. 4.2](#). Queste premesse rendono quindi possibile usare questo metodo solo in pochi casi e solo per aree limitate.

Potendo utilizzare il Metodo delle curve di livello solo raramente, per la realizzazione di una sezione geologica dovremo agire diversamente, ed è quello che verrà illustrato in questo capitolo. In questo capitolo vedremo quindi le varie fasi di realizzazione di una generica sezione geologica e le varie considerazioni che devono essere fatte per trasferire le informazioni dalla carta geologica alla sezione.

8.2 Interpretazione e sezioni geologiche

Una sezione geologica è la rappresentazione delle strutture presenti in una carta geologica su di un piano verticale. La realizzazione di una sezione geologica è un momento molto importante nello studio geologico di un'area, in quanto essa permette di incorporare in un unico elaborato informazioni dedotte dalla carta geologica, informazioni raccolte in campagna, interpretazioni del geologo, idee sull'evoluzione tettonica dell'area, ecc. La realizzazione di una sezione geologica permette inoltre di controllare e perfezionare l'interpretazione tettonica presentata nella carta geologica: alcuni errori presenti nella carta geologica possono essere messi in evidenza (e quindi corretti) durante la realizzazione di una sezione, alcune strutture geologiche non molto evidenti in carta possono essere riconosciute solo quando si realizza una sezione. Le sezioni geologiche sono il metodo migliore per rappresentare la struttura geologica tridimensionale di un'area.

Una sezione geologica corretta deve essere perfettamente compatibile con tutte le strutture geologiche presenti in carta. È importante ricordare che con gli stessi affioramenti spesso sono possibili interpretazioni del tutto diverse di una struttura geologica, come evidenziato in [Fig. 8.1](#). Sarà la competenza del geologo nel riconoscere i veri rapporti

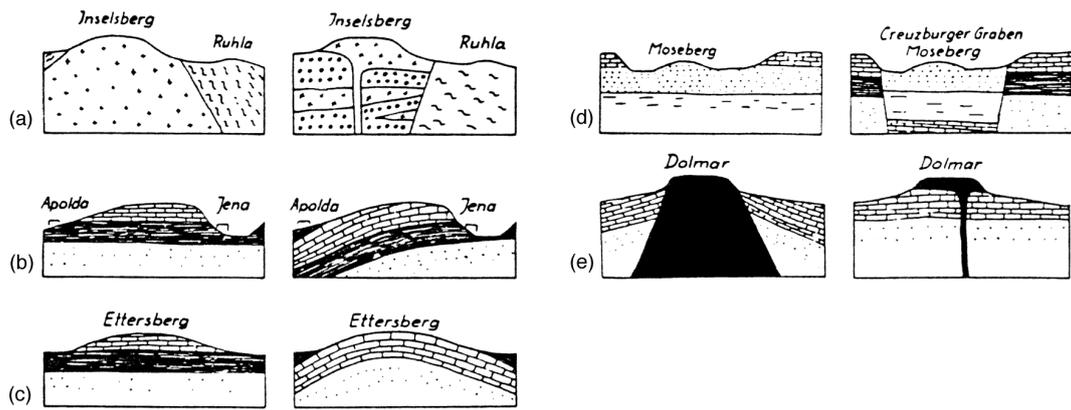


Figura 8.1 Sezioni geologiche schematiche che illustrano differenti possibili interpretazioni geologiche partendo dai soliti dati di superficie.

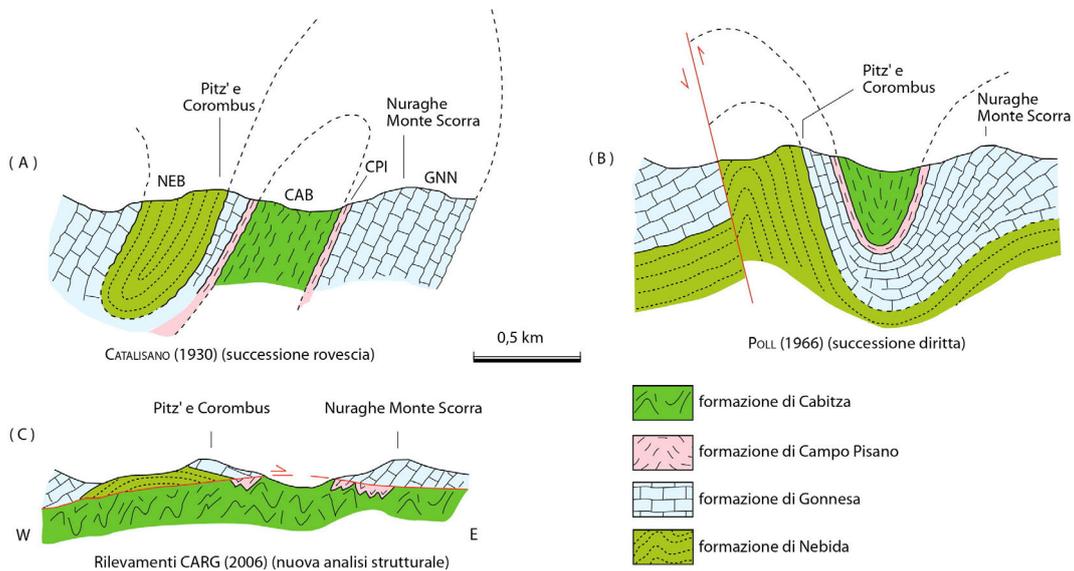


Figura 8.2 Differenti interpretazioni geologiche dell'area di M. Scorra (Sardegna sud-occidentale), da FUNEDDA *et alii* (2006).

geometrici tra le varie formazioni, che permetteranno di realizzare la sezione geologica corretta.

Tutte le sezioni geologiche pubblicate risentono fortemente delle conoscenze geologiche del tempo in cui sono state realizzate, un esempio di questo è illustrato in Fig. 8.2 che rappresenta sezioni geologiche realizzate nel tempo nella stessa area, in Sardegna. In Fig. 8.2a è illustrata una sezione realizzata nel 1930, in un periodo in cui si pensava che le principali strutture tettoniche che potessero interessare un'area potessero essere solamente pieghe (anticlinali e sinclinali) a scala chilometrica, mentre faglie e sovrascorrimenti non si pensava si potessero sviluppare a scala regionale. La Fig. 8.2b illustra la solita struttura in una sezione del 1966, in questo periodo era stata riconosciuta la presenza di faglie inverse, ma in generale non si pensava che sovrascorrimenti potessero esistere a scala regionale. In questa interpretazione la successione stratigrafica è l'inverso di quella delle sezione precedente. La Fig. 8.2c illustra una sezione realizzata recentemente, attualmente anche in quest'area, oltre a pieghe, sono stati riconosciuti sovrascorrimenti a scala regionale che

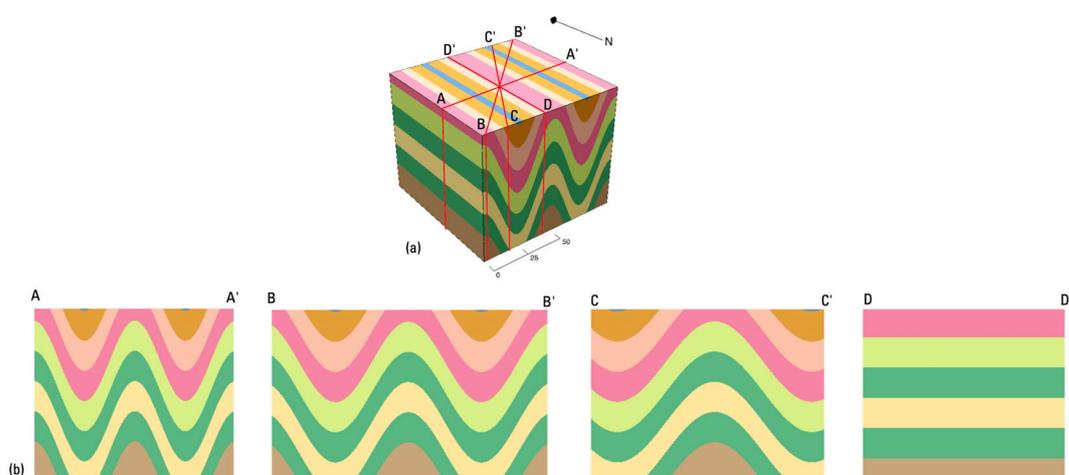


Figura 8.3 (a) Sistema di pieghe con piano assiale verticale e asse con direzione Nord-Sud. Queste pieghe sono tagliate con una serie di sezioni geologiche, con orientazioni variabili rispetto all'asse. (b) Sezioni geologiche. Le sezioni formano angoli di 90° , 42° , 30° e 0° rispetto all'asse delle pieghe. L'angolo di apertura (apparente) delle pieghe in sezione aumenta quanto più è obliqua la sezione rispetto all'asse.

portano formazioni geologiche più antiche al di sopra di formazioni più recenti.

8.3 Scegliere l'orientazione della sezione

Le sezioni geologiche sono costruite per rappresentare le strutture geologiche presenti in un'area, per poter rappresentare la reale geometria delle strutture le sezioni devono essere realizzate perpendicolarmente rispetto alla direzione degli strati, rispetto alla direzione degli assi delle pieghe, rispetto alla direzione dei contatti tettonici (faglie, sovrascorrimenti) presenti. Solo in alcuni casi sezioni geologiche sono richieste con direzioni particolari, come ad esempio per la realizzazione di strade o linee ferroviarie (la sezione deve essere realizzata in coincidenza del futuro tracciato) oppure per l'apertura di cave o miniere, nei quali casi possono essere richieste anche sezioni geologiche orizzontali per una migliore valutazione volumetrica del giacimento.

La ragione per cui si realizzano sezioni ortogonali alla direzione degli strati è molto semplice. Se si realizzano sezioni ortogonali alla direzione degli strati, tutti gli strati che saranno riportati in sezione mostreranno la loro vera inclinazione (l'inclinazione reale) e il loro vero spessore, mentre se la sezione è obliqua rispetto alla direzione degli strati questi saranno rappresentati in sezione non con la loro inclinazione reale, ma con la loro inclinazione apparente (vedi [Capitolo 3.2](#) e [Fig. 3.5](#)) e con uno spessore che non è quello reale, ma maggiore.

Lo stesso vale per i rapporti tra pieghe e sezioni geologiche. Se una sezione è ortogonale alla direzione dell'asse di una piega, la piega sarà rappresentata con la sua geometria reale (spessore degli strati reale, angolo di apertura della piega reale, ecc.), se invece la sezione è obliqua rispetto all'asse della piega l'angolo di apertura della piega risulterà maggiore del reale nella sezione geologica e anche lo spessore degli strati sarà diverso. Questo è illustrato in [Fig. 8.3](#), in cui è rappresentato un sistema di pieghe con asse orizzontale orientato Nord-Sud. In questo sistema di pieghe sono state realizzate quattro sezioni geologiche diversamente orientate. La Sezione A-A' forma un angolo di 90° (è ortogonale) rispetto

all'asse delle pieghe, la Sezione B-B' forma un angolo di 42° con l'asse delle pieghe, la Sezione C-C' forma un angolo di 30° con l'asse delle pieghe, la Sezione D-D' è parallela all'asse delle pieghe. La reale geometria delle pieghe sarà osservabile solo nella Sezione A-A', quella ortogonale all'asse delle pieghe. Nella Sezione B-B', che forma un angolo di 42° con l'asse della piega, le pieghe risulteranno con una geometria più aperta e gli strati avranno uno spessore maggiore del reale. Questo è ancora più evidente nella Sezione C-C', che forma un angolo di 30° con l'asse delle pieghe. Se poi si realizza una sezione geologica parallela all'asse delle pieghe (cioè un angolo di 0° tra sezione geologica e assi), in sezione non sarebbe rappresentata nessuna piega, con nessuna cerniera o fianchi.

Per tutte queste ragioni prima di scegliere l'orientazione di una sezione è bene riflettere molto sulla sua direzione perché una sezione realizzata con una direzione non adatta potrebbe rappresentare in modo non reale o non rappresentare del tutto alcune strutture geologiche invece presenti in carta.

8.4 Fasi di realizzazione di una sezione geologica

Dopo avere stabilito la traccia della sezione e avere attentamente esaminato la carta geologica, la realizzazione di una sezione geologica avviene attraverso le seguenti fasi successive:

- a) *Realizzazione del profilo topografico* (Fig. 8.4a). La realizzazione del profilo topografico non viene descritta in queste dispense, durante i corsi di Geomorfologia lo studente dovrebbe avere acquisito le nozioni base di cartografia necessarie per la realizzazione del profilo topografico¹. Le lettere A-A' indicano l'orientazione della sezione in carta.
- b) *Riportare i contatti lungo la traccia*. Nella sezione vengono riportate tutte le informazioni facilmente deducibili dalla carta geologica senza particolari elaborazioni. Si riportano in questa fase iniziale tutti i contatti geologici che si incontrano lungo la traccia della sezione geologica (Fig. 8.4b). Preliminarmente la giacitura dei contatti viene indicata sulla sezione in modo approssimato, ricavandola dalla lettura della carta geologica cioè dall'andamento dei contatti in carta e dalla forma degli affioramenti. In questa fase è utile riportare le sigle delle formazioni e colorare la parte superficiale della sezione osservando le formazioni geologiche che affiorano lungo la sezione.
- c) *Riportare le misure e i contatti in profondità*. Devono essere, a questo punto, riportate in modo esatto tutte le informazioni presenti in carta sulla sezione geologica (Fig. 8.4c). È questa la fase più critica della realizzazione di una sezione geologica, in cui si proiettando le misure, i contatti stratigrafici, i contatti tettonici sulla sezione. È a questo punto che il geologo sapendo se ha a che fare con contatti planari, pieghe con asse orizzontale o pieghe con asse inclinato, in quanto ognuna di queste situazioni adotta metodi di proiezione differenti. Quali metodi di proiezione adottare nei vari casi è illustrato nel **Capitolo 8.5**. In questa fase vengono considerate anche le strutture geologiche che si trovano ad una certa distanza dalla sezione, in questo modo viene estrapolato l'andamento degli strati e dei contatti tettonici in profondità.
- d) *Sigle e contatti*. Alla sezione vengono aggiunte le sigle delle varie formazioni, vengono disegnati in modo definitivo con tratto continuo i contatti e con un tratteggio i contatti ricostruiti al di sopra della superficie topografica (Fig. 8.4d). Con uno spessore diverso e un colore differente (solitamente in rosso) vengono indicati i contatti tettonici.

¹Sono comunque disponibili le dispense "Profili topografici" dal sito web: <https://www.pconti.net>.

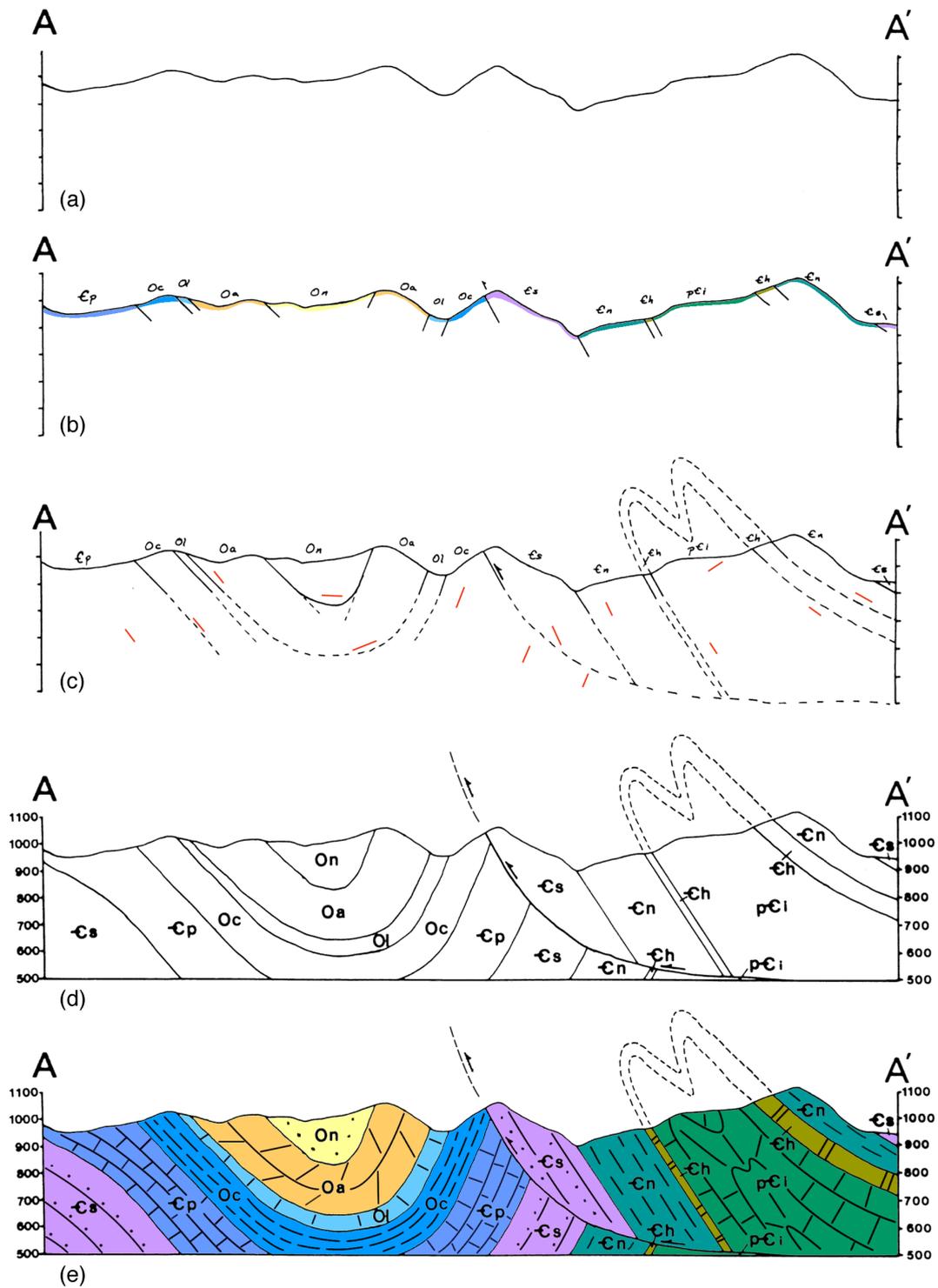


Figura 8.4 Fasi di realizzazione di una sezione geologica. (a) Profilo topografico. (b) Giaciture dei contatti sulla sezione. (c) Ricostruzione dell'andamento dei contatti e delle strutture geologiche. In rosso sono riportate le misure proiettate. (d) Disegno dei contatti e sigle delle formazioni. (e) Sezione geologica completata con figurati e colori.

- e) *Figurati e colori*. La sezione è ulteriormente completata con i colori già visti in Fig. 1.3 e i figurati di Fig. 1.5. Per quanto riguarda i figurati, è molto importante che il loro andamento segua la curvatura dei contatti, in modo da facilitare anche visivamente il riconoscimento delle pieghe nella sezione. Il risultato finale è rappresentato in Fig. 8.4e.

8.5 Trasferire informazioni dalla carta alla sezione geologica

Prima di trasferire le informazioni presenti in carta sulla sezione geologica è necessario analizzare l'andamento dei contatti in carta e stabilire se ci sono solo superfici geologiche planari oppure anche superfici piegate.

Se nell'area sono presenti solo superfici geologiche planari bisogna a questo punto stabilire se:

- 1) *la traccia della sezione è ortogonale rispetto alla direzione degli strati*; oppure se,
 - 2) *la traccia della sezione è obliqua rispetto alla direzione degli strati*.
- Se invece sono presenti anche superfici piegate bisogna stabilire se:
- 3) *l'asse delle pieghe è orizzontale e la sezione è ortogonale rispetto all'asse delle pieghe*; oppure se,
 - 4) *l'asse delle pieghe è orizzontale e la sezione è obliqua rispetto all'asse delle pieghe*; oppure se,
 - 5) *l'asse delle pieghe è inclinato*.

Questi cinque casi sono rappresentati in modo schematico in Fig. 8.5.

Una volta stabilito in quale dei cinque casi ci si trova, si devono usare varie tecniche di proiezione per misure e contatti, che differiscono notevolmente da caso a caso e che sono indicate in Fig. 8.6. Nei seguenti capitoli (Capitolo 8.5.1–Capitolo 8.5.5) saranno illustrate le tecniche di proiezione che devono essere usate in ognuno di questi cinque casi.

8.5.1 Sezione in superfici planari, sezione ortogonale alla direzione degli strati

È il caso più semplice di sezione geologica (Fig. 8.5a). La traccia della sezione è ortogonale alla direzione degli strati presenti in carta e a eventuali contatti tettonici, faglie, ecc. Tutti gli strati e tutti i contatti tettonici sono superfici planari, cioè non sono presenti pieghe. È possibile realizzare una sezione in tre modi: a) con la costruzione mediante curve di livello; b) proiettando in sezione le misure presenti in carta.

Costruzione con curve di livello

Per realizzare questa costruzione ci si basa sulla rappresentazione delle superfici geologiche mediante curve di livello, come illustrato nel Capitolo 4 a pagina 39. La sezione si costruisce seguendo le istruzioni indicate in Fig. 4.1 e in Fig. 4.2.

Proiezione di misure

Nella maggior parte delle carte geologiche vi sono delle misure di strato utili alla ricostruzione dell'andamento dei contatti, queste misure possono essere facilmente riportate sulla sezione geologica. Se i contatti sono delle superfici piane e se la direzione degli strati

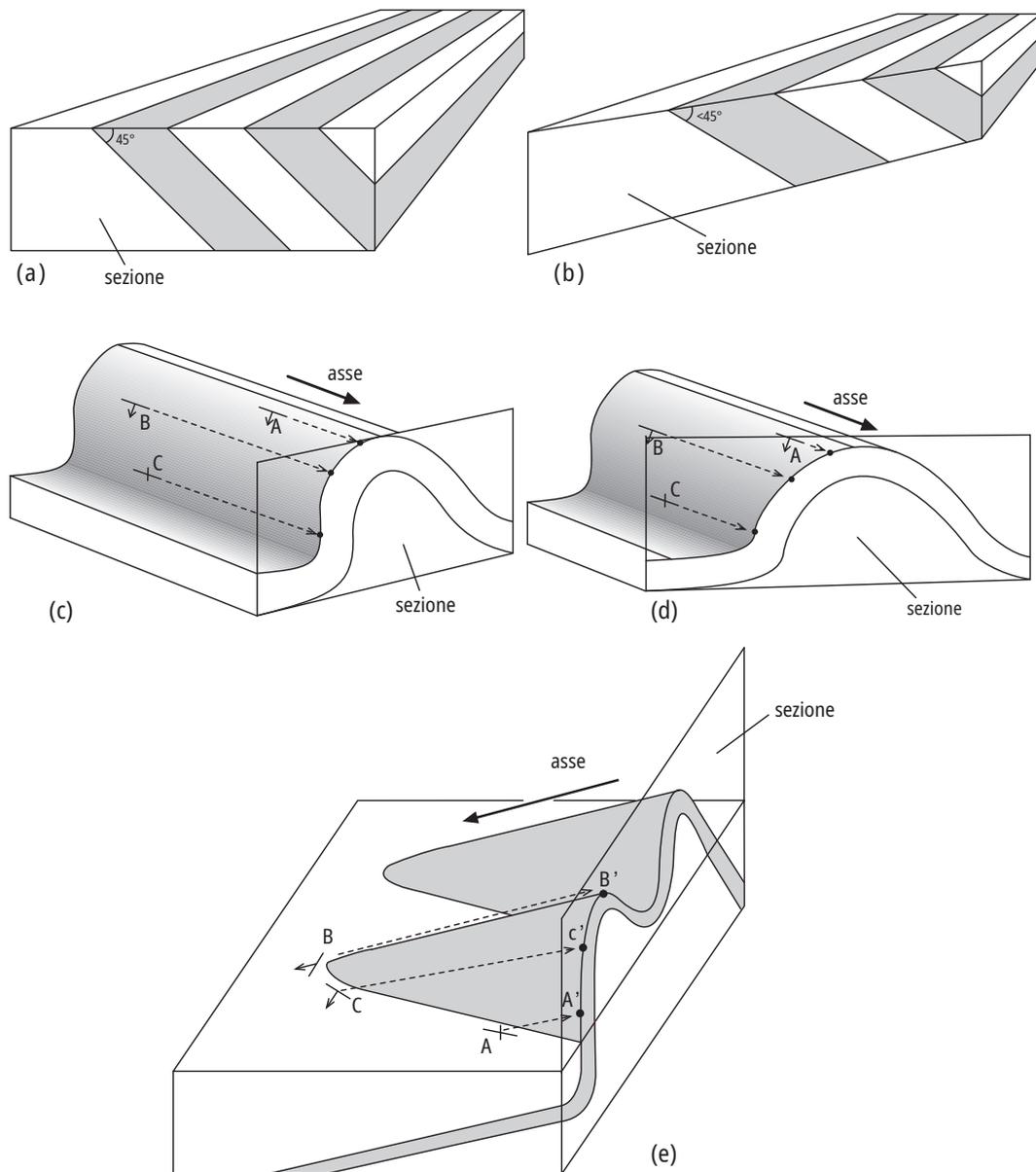


Figura 8.5 Rapporti tra strutture e orientazione delle sezioni geologiche. (a) Sezione geologica in un'area con solo superfici planari, la sezione è orientata ortogonale alla direzione degli strati. (b) Sezione in area con superfici planari, ma la sezione è obliqua rispetto alla direzione degli strati. (c) Sezione in una piega con asse orizzontale, la sezione è ortogonale all'asse della piega. (d) Sezione in una piega con asse orizzontale, la sezione è obliqua rispetto all'asse della piega. (e) Sezione in una piega con asse inclinato.

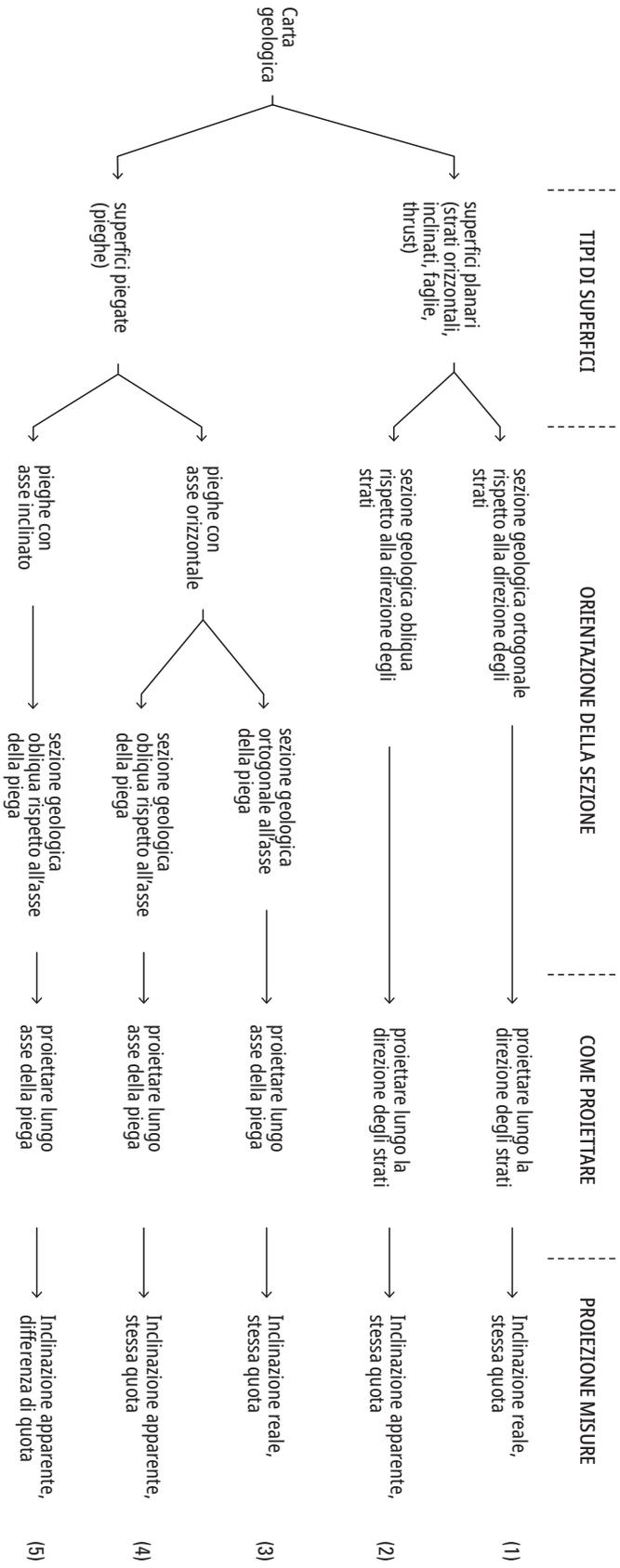


Figura 8.6 Possibili modalità di proiezione di misure in base alle strutture presenti in carta. Le cinque modalità di proiezione rappresentano i cinque casi illustrati in Fig. 8.5.

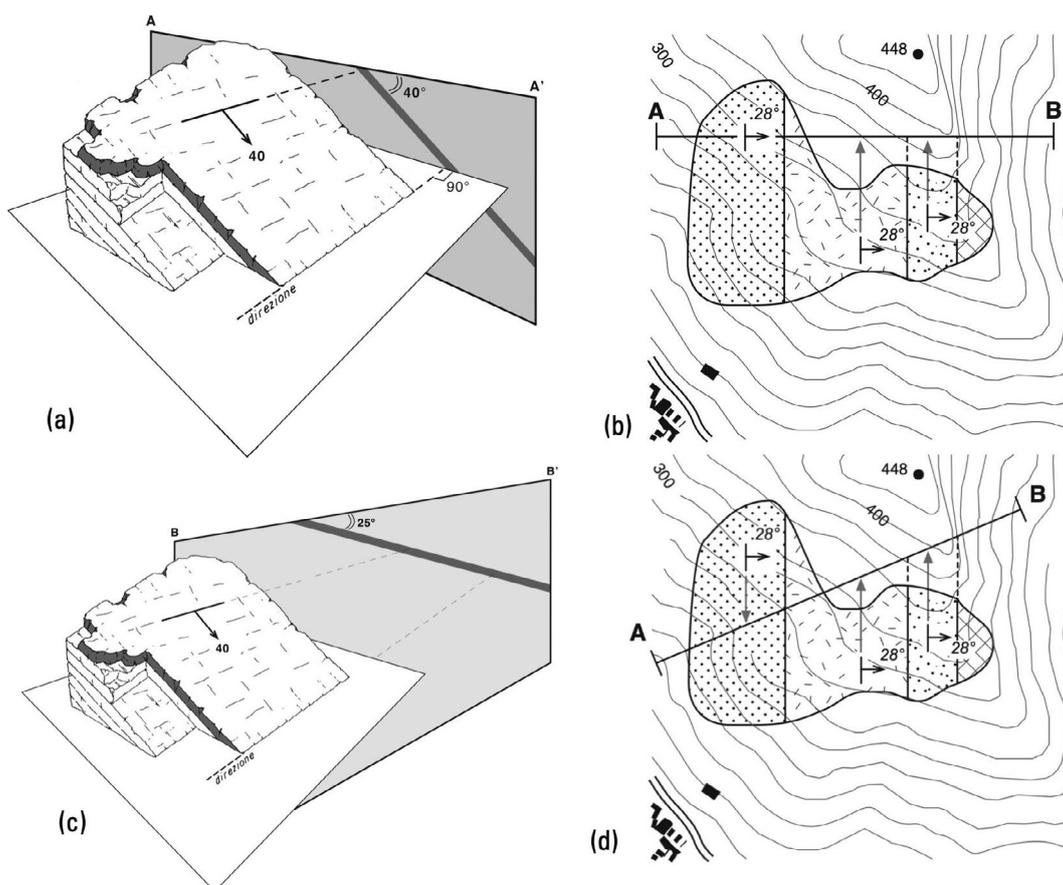


Figura 8.7 (a) Proiezione di una misura su una sezione ortogonale alla direzione dello strato. (b) Proiezione di misure in strati con direzione ortogonale alla traccia della sezione. (c) Proiezione di una misura su una sezione obliqua rispetto alla direzione dello strato. (d) Proiezione di misure in strati con direzione obliqua rispetto alla traccia della sezione.

è ortogonale alla traccia della sezione, come ad esempio illustrato in Fig. 8.7a, le misure vanno riportate sulla sezione con la loro inclinazione reale e alla stessa quota.

Se la direzione della misura è ortogonale alla traccia della sezione geologica si riporta innanzi tutto la misura sulla traccia della sezione geologica prolungandone la direzione Fig. 8.7b. Il punto così trovato avrà la quota della misura e nella sezione geologica sarà riportato con questa elevazione. Ciò significa che una misura potrà cadere sul profilo morfologico, ma anche inferiormente o superiormente rispetto alla superficie topografica. Nella sezione geologica la misura andrà comunque riportata con l'inclinazione indicata in carta, cioè con l'inclinazione reale.

8.5.2 Sezione in superfici planari, sezione obliqua rispetto alla direzione degli strati

In questo caso la traccia della sezione è obliqua rispetto alla direzione degli strati presenti e a eventuali contatti tettonici, faglie, ecc. Tutti gli strati e tutti i contatti tettonici sono superfici planari, cioè non sono presenti pieghe. Anche in questo caso è possibile realizzare una sezione: a) con la costruzione mediante curve di livello, oppure b) proiettando in sezione le misure presenti in carta.

Costruzione con curve di livello

La costruzione con il metodo delle curve di livello, già illustrato nel [Capitolo 4 a pagina 39](#) e in [Fig. 4.1](#) e in [Fig. 4.2](#), è applicabile esattamente con la stessa modalità e procedura anche al caso di sezioni geologiche oblique rispetto alla direzione.

Proiezione di misure

Misure con direzione obliqua rispetto alla traccia della sezione possono essere facilmente riportate sulla sezione geologica se si tratta di superfici piane, come ad esempio illustrato in [Fig. 8.7c,d](#). Le misure vanno riportate sulla sezione alla stessa quota, ma rispetto a quanto visto nel precedente [Capitolo 8.5.1](#), in questo caso con la loro inclinazione apparente (per informazioni sull'inclinazione apparente e su come si calcola vedi il [Capitolo 3.2](#) e [Capitolo 3.3](#)).

Analogamente a quanto già visto, se la misura non è raccolta lungo la traccia della sezione geologica la sua posizione sulla sezione sarà determinata prolungando la direzione fino ad intercettare la traccia della sezione, mantenendo la sua quota.

8.5.3 Sezione in pieghe con asse orizzontale, sezione ortogonale all'asse delle pieghe

Quando in una carta geologica sono presenti delle pieghe, *le misure presenti in carta devono essere riportate in sezione traslandole parallelamente alla direzione dell'asse della piega e non parallelamente alla direzione della misura*. Questa regola è molto importante ed è valida sempre, per qualsiasi tipo di piega, con qualsiasi orientazione dell'asse.

Nel caso particolare di pieghe con asse orizzontale ([Fig. 8.5c](#)) la direzione dell'asse coincide sempre con la direzione delle misure (qualsiasi inclinazione esse abbiano), ed è quindi indifferente affermare quindi che la proiezione avviene parallelamente alla direzione dell'asse o parallelamente alla direzione delle misure.

Nel caso in cui l'asse è anche ortogonale alla sezione geologica, non è necessaria alcuna correzione per l'inclinazione apparente: le misure possono essere riportate in sezione con la loro inclinazione reale, cioè con l'inclinazione indicata in carta.

Anche in questo caso è possibile realizzare una sezione: a) con la costruzione mediante curve di livello, oppure b) proiettando in sezione le misure presenti in carta.

Costruzione con curve di livello

Può essere applicato senza problemi questo metodo, come già illustrato nel già illustrato nel [Capitolo 4 a pagina 39](#).

La costruzione di una sezione mediante curve di livello in una struttura piegata è illustrata in [Fig. 8.8a,b,c](#). Riportando i punti in cui i contatti intersecano la stessa isoipsa è possibile ricostruire la geometria dei contatti geologici. Nella sezione geologica inoltre è possibile individuare i punti di cerniera per i vari livelli piegati ([Fig. 8.8c](#)). I punti di cerniera possono quindi essere riportati nella carta geologica ([Fig. 8.8d](#)) e la loro unione definisce in carta una linea, la traccia del piano assiale della piega ([Fig. 8.8e](#)).

È importante ricordare che sul terreno la traccia del piano assiale può essere riconosciuta come la linea che:

- a) unisce tutti i punti in cui le pieghe sono simmetriche e hanno un profilo a "M";

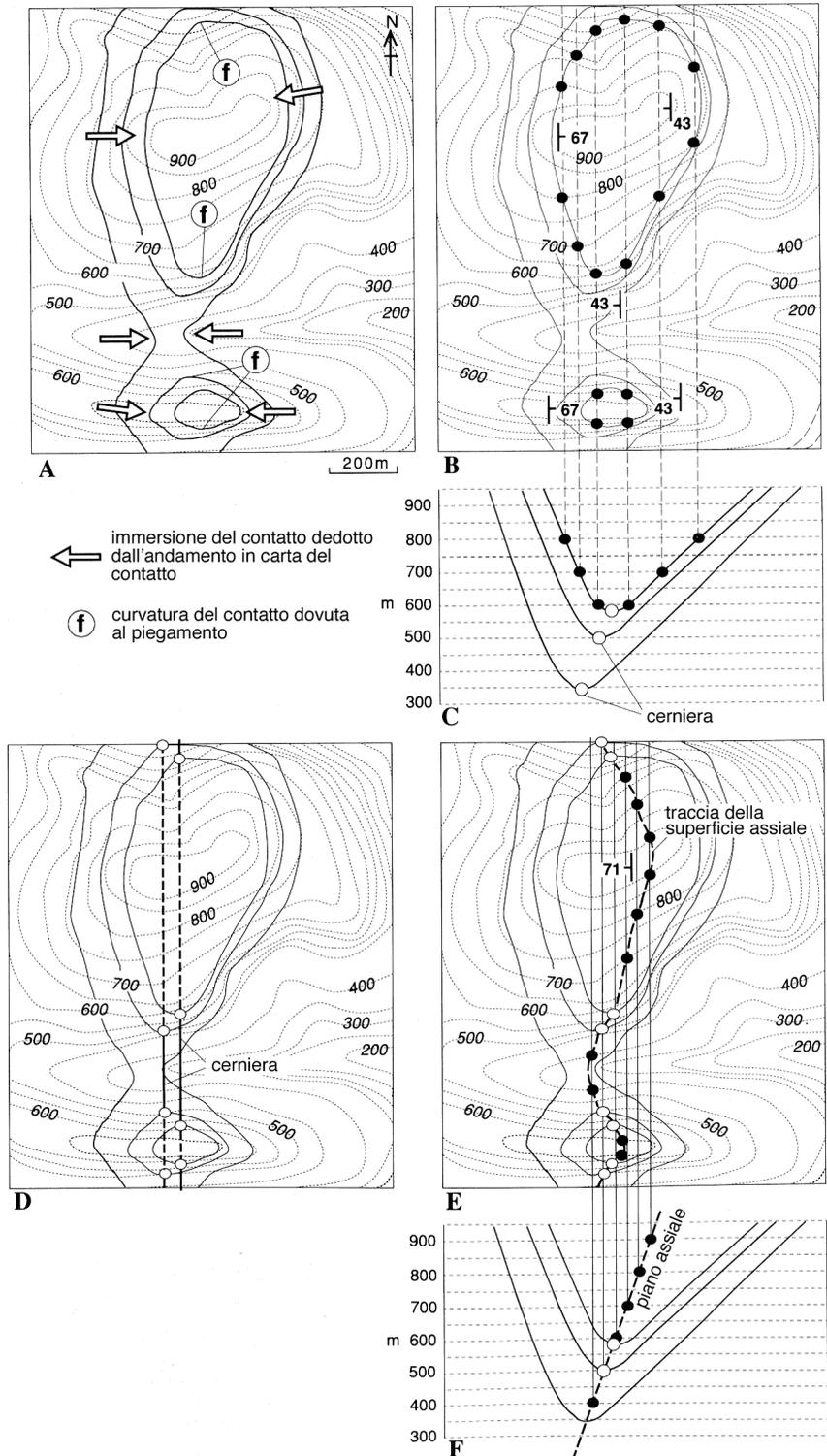


Figura 8.8 Ricostruzione della geometria di pieghe e traccia del piano assiale di pieghe mediante curve di livello.

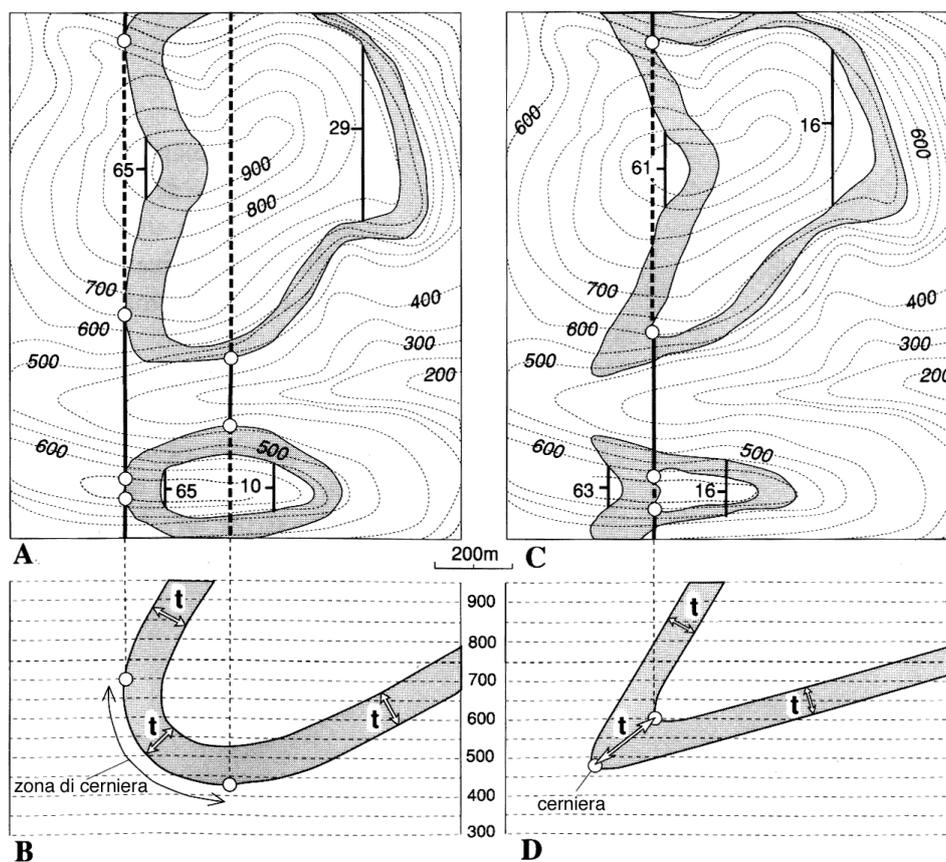


Figura 8.9 Carte geologiche e sezioni di pieghe con differente profilo.

- b) unisce tutti i punti in cui la stratificazione è ortogonale alla foliazione di piano assiale della piega (oppure una S1 è ortogonale alla S2);
- c) separa domini in cui le pieghe a piccola scala hanno un'asimmetria a "S" da quelli in cui le pieghe hanno un'asimmetria a "Z" (attenzione: sempre guardando nella stessa direzione!);
- d) separa domini con diversi rapporti stratificazione/foliazione;
- e) separa domini con diverse direzioni di ringiovanimento degli strati (se è conosciuta la successione stratigrafica).

L'andamento dei contatti permette anche di stabilire la forma della piega. È possibile, per esempio, distinguere tra una piega parallela con cerniera arrotondata (Fig. 8.9a,b) e una piega con fianchi rettilinei e cerniera ispessita (Fig. 8.9c,d).

Proiezione di misure

Le misure possono essere riportate sulla sezione geologica parallelamente alla loro direzione parallelamente all'asse, con la loro inclinazione reale (Fig. 8.5c). Analogamente a quanto già visto, se la misura non è raccolta lungo la traccia della sezione geologica la sua posizione sulla sezione sarà determinata prolungando la direzione fino ad intercettare la traccia della sezione, mantenendo la sua quota.

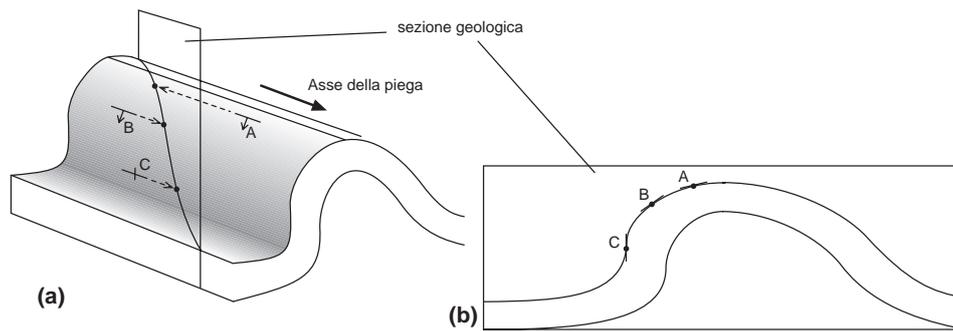


Figura 8.10 (a) Piega con asse orizzontale. (b) Sezione geologica obliqua all'asse della piega. Le tre misure A, B e C sono riportate sulla sezione geologica.

8.5.4 Sezione in pieghe con asse orizzontale, sezione obliqua rispetto all'asse delle pieghe

Essendo anche questo un caso di pieghe con asse orizzontale (Fig. 8.5d), come già discusso, la direzione dell'asse coincide sempre con la direzione delle misure (qualsiasi inclinazione esse abbiano). La proiezione delle misure sulla sezione avverrà quindi sempre secondo questa direzione.

L'asse però in questo caso è obliquo rispetto alla direzione della sezione geologica, questo implica che le misure non devono essere riportate in sezione con la loro inclinazione reale, ma è necessaria la correzione per l'inclinazione apparente. Anche in questo caso è possibile realizzare una sezione: a) con la costruzione mediante curve di livello, oppure b) proiettando in sezione le misure presenti in carta.

Costruzione con curve di livello

Può essere applicato senza problemi questo metodo, come già illustrato nel [Capitolo 8.5.3](#).

Proiezione di misure

Le misure possono essere riportate sulla sezione geologica parallelamente alla loro direzione (ovvero parallelamente all'asse della piega), come già illustrato in Fig. 8.10. Le misure però, poiché la sezione è obliqua rispetto all'asse della piega, devono essere riportate sulla sezione con la loro inclinazione apparente.

8.5.5 Sezione in pieghe con asse inclinato

Se si vuole realizzare una sezione in una struttura a pieghe con asse inclinato (il caso più comune in natura) la cosa è più complicata, perché in questo caso direzione delle misure e direzione dell'asse della piega non coincidono, se non nel caso particolare di misure verticali. Come si è già detto in precedenza, *le misure degli strati piegati devono essere riportate in sezione traslandole parallelamente alla direzione dell'asse della piega e non parallelamente alla direzione della misura*. Questo è bene evidente nel caso di una piega con asse inclinato, come illustrato in Fig. 8.11a.

Differentemente rispetto ai casi visti in precedenza, in pieghe con asse inclinato non è possibile applicare la costruzione con il metodo con le curve di livello e non è possibile

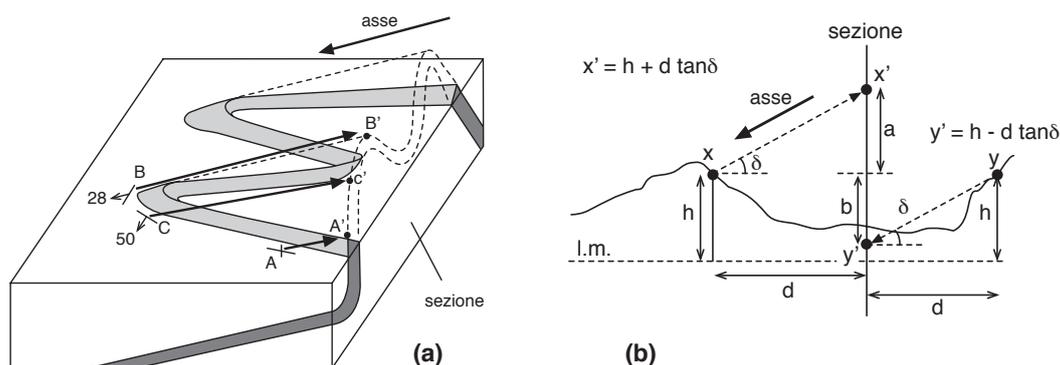


Figura 8.11 (a) Schema tridimensionale di una struttura a pieghe cilindriche con asse inclinato e ortogonale alla sezione. (b) Proiezione di un punto (x) secondo un asse inclinato sulla sezione geologica (x'), δ è l'inclinazione dell'asse (28° in questo esempio). La superficie orizzontale di riferimento può essere il livello del mare (l.m.), in questo modo h è la quota della misura letta sulla carta topografica. A seconda della distanza d del punto rispetto alla traccia della sezione geologica, esso andrà alzato o abbassato di $d \tan \delta$ rispetto alla sua quota sulla carta.

la proiezione di contatti, è solo possibile proiettare le misure sulla sezione e con queste ricostruire l'andamento dei contatti.

In Fig. 8.11a è schematicamente illustrata una struttura a pieghe in cui sono rappresentate tre misure della superficie piegata:

- la misura A è verticale (quindi la direzione di questa misura ci fornisce la direzione dell'asse della piega);
- la misura B tra tutte le misure è quella con l'inclinazione minore e la sua direzione è ortogonale alla direzione della misura A, la misura B è quindi stata raccolta nella cerniera della piega e la sua inclinazione è l'inclinazione dell'asse della piega;
- la misura C ha direzione e inclinazione intermedie tra quelle della misura A e B e quindi è raccolta sul fianco della piega.

Dalla Fig. 8.11a è inoltre evidente che la misura A dovrà essere proiettata parallelamente all'asse della piega nel punto A' (fianco verticale della piega), la misura B nel punto B' (cerniera della piega) e la misura C in una posizione intermedia tra le due, nel fianco della piega. È importante notare che:

- tutte le misure dovranno avere in sezione una quota maggiore di quella che avevano nella realtà (sulla carta);
- la quota delle misure in sezione dipenderà: i) dalla quota che avevano nella realtà; ii) dalla loro distanza dalla sezione e iii) dall'inclinazione dell'asse;
- tutte le misure devono essere riportate in sezione con la loro inclinazione apparente.

Nella pratica se vogliamo proiettare una misura ubicata in carta in un punto x , di quota h , su una sezione geologica distante d , parallelamente ad un asse di inclinazione δ , possiamo basarci sulla costruzione di Fig. 8.11b dove si vede che il punto x avrà sulla sezione una quota x' :

$$x' = h + d \tan \delta \quad (8.1)$$

rispetto ad una superficie orizzontale di riferimento (es. livello del mare).

L'Eq. 8.1 vale per punti che vanno proiettati al di sopra della loro quota in carta, cioè per misure che stanno tutte dalla stessa parte della traccia della sezione geologica. Se ci sono punti che vanno proiettati al di sotto della loro quota in carta, cioè per misure che stanno dalla parte opposta della traccia della sezione geologica (punto y in Fig. 8.11b), essi

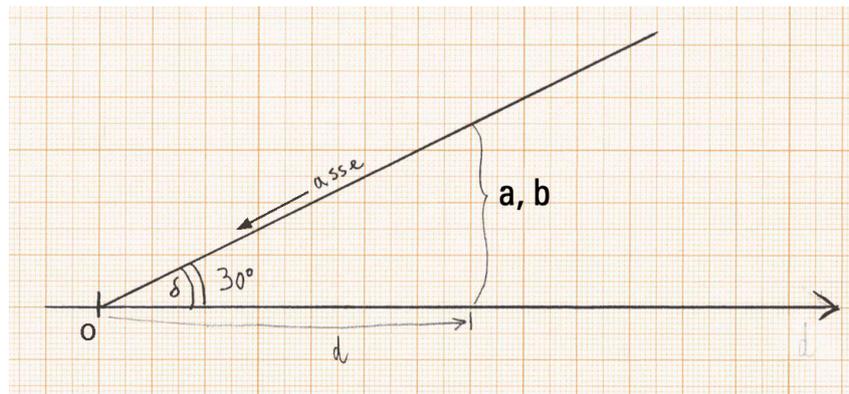


Figura 8.12 Soluzione grafica per determinare l'elevazione o la diminuzione di quota di una misura (a, b in Fig. 8.11b) rispetto alla sua misura in carta in funzione della distanza dalla sezione (d) e dell'inclinazione dell'asse (δ).

vanno riportati in sezione utilizzando la seguente relazione:

$$y' = h - d \tan \delta \quad (8.2)$$

Se si vuole una soluzione veloce ma meno esatta senza risolvere l'Eq. 8.1 l'Eq. 8.2, è possibile ricorrere alla costruzione grafica di Fig. 8.12.

Su carta millimetrata si riporta una retta con l'inclinazione dell'asse ($\delta=30^\circ$ nell'esempio), il punto O è il punto dove questa retta incontra un asse orizzontale di riferimento. Se, per esempio, si vuole riportare in sezione una misura che dista 7 cm dalla traccia della sezione ($d=7$ cm), si conta 7 cm sull'asse orizzontale partendo dal punto O e in verticale si può leggere in centimetri (x') di quanto va innalzata la misura rispetto alla quota indicata in carta ($x'=3,5$ cm nell'esempio).

È evidente che qualsiasi tipo di proiezione di misure può essere effettuato solo se le pieghe presenti sono cilindriche, cosa che può essere dedotta da uno studio geologico completo dell'area. Per questo tipo di analisi (valutazione del grado di cilindricità della piega, inclinazione dell'asse, ecc.) di fondamentale importanza i metodi di analisi delle superfici piegate mediante proiezioni stereografiche discussi Appendice a pag. 105.

Come già detto, una volta trovata la posizione della misura sulla sezione, la misura andrà riportata con la sua inclinazione apparente.

9

Metodi degli archi di cerchio e delle bisettrici

9.1 Introduzione

Informazioni sulla giacitura degli strati in un'area possono essere ricavate durante il rilevamento in campagna, mediante la realizzazione di sondaggi, da indagini geofisiche, ecc. Se nell'area vogliamo realizzare una sezione geologica queste informazioni devono essere estrapolate in profondità.

Attualmente sono due i metodi più usati per realizzare sezioni geologiche estrapolando a grande profondità informazioni di giaciture:

- a) il *Metodo degli archi di cerchio*
- b) il *Metodo delle bisettrici*.

Entrambi i metodi assumo che nell'area lo spessore delle formazioni rimanga costante, anche se sono presenti delle pieghe: con il Metodo degli archi di cerchio viene assunto che le pieghe siano parallele e concentriche (Fig. 9.1), con il Metodo delle bisettrici si assume che le pieghe abbiano una geometria a kink.

Questi sono due "metodi geometrici" per la realizzazione di sezioni geologiche in quanto non è necessaria alcuna valutazione dell'andamento dei contatti o altre interpretazioni soggettive per completare la sezione. Partendo dai dati di superficie disponibili e applicando i principi dei due metodi, la realizzazione della sezione avviene in modo automatico.

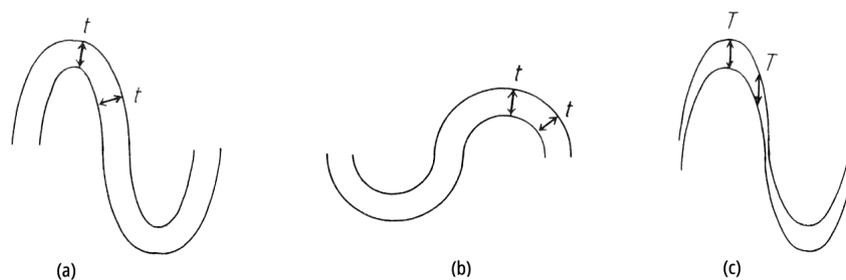


Figura 9.1 Geometria di uno strato piegato. (a) Piegatura parallela, lo spessore dello strato (t) è costante in tutti i punti della piega. (b) Piegatura concentrica, lo spessore dello strato (t) è costante in tutti i punti della piega ed inoltre le cerniere sono rappresentate da archi di circonferenze. (c) Piegatura simile, lo spessore dello strato non è costante, è costante solo la distanza T , misurata parallelamente al piano assiale della piega.

Per questi motivi, nonostante le limitazioni (nessuna variazione di spessore, pieghe solo concentriche o kink), questi metodi sono molto popolari e costituiscono la base teorica utilizzata da vari software per la realizzazione di sezioni geologiche mediante computer.

9.2 Metodo degli archi di cerchio

Il Metodo degli archi di cerchio, anche detto anche *Metodo di Busk* (Busk, 1929), assume che in un'area:

- a) le pieghe siano parallele, cioè lo spessore degli strati rimane costante in tutta la piega;
- b) le pieghe abbiano cerniere arrotondate; tutte le pieghe in questo modo possono essere disegnate da una serie di archi di cerchio.

Per realizzare una sezione geologica con questo metodo si inizia tracciando l'andamento degli strati tra due giaciture adiacenti lungo la traccia della sezione geologica. Per fare questo si devono tracciare le due normali alle misure (misure A e B in Fig. 9.2a), che si incontreranno nel punto O. Dal punto O si tracciano con il compasso degli archi di cerchio che passando anche dalle misure A e B descriveranno l'andamento degli strati al di sotto e al di sopra della superficie topografica tra queste due misure. Ovviamente questi archi di cerchio potranno essere tracciati solo fino al punto O. Nel caso della Fig. 9.2a la misura B ha un'inclinazione maggiore rispetto alla misura A, il punto O è perciò al di sotto della superficie topografica e siamo quindi in presenza di una antiformenta. Nel caso della Fig. 9.2b invece la misura B ha un'inclinazione minore rispetto alla misura A, il punto O è perciò al di sopra della superficie topografica e siamo quindi in presenza di una sinformenta.

Nel caso di una ulteriore terza misura (vedi Fig. 9.2c-f) le normali alle misure B e C si incontreranno nel punto O' e dovrà essere usato questo punto per disegnare gli archi di cerchio tra le misure B e C. La posizione del punto O' rispetto al punto O dipenderà dall'inclinazione della misura C e dalla distanza tra la misura B e C, questo sia nel caso di una antiformenta (Fig. 9.2c,d), che di una sinformenta (Fig. 9.2e,f).

Nei casi della Fig. 9.2c-f le tre misure A, B e C hanno una inclinazione progressivamente sempre maggiore, cioè la misura B ha una inclinazione maggiore della misura A e la misura C ha una inclinazione maggiore della misura B. Questo implica che il punto O e il punto O' si troveranno entrambi al di sotto della superficie topografica nel caso di una antiformenta o entrambi al di sopra, nel caso di una sinformenta. Lo stesso si ha nel caso le tre misure diminuiscano progressivamente di inclinazione.

Se si hanno tre misure ma la loro inclinazione non aumenta (o diminuisce) progressivamente, cioè per esempio la misura B ha una inclinazione minore rispetto alla misura A e la misura C ha una inclinazione maggiore rispetto alla misura B, si avrà che i punti O e O' si troveranno da parti opposte rispetto alla superficie topografica. La Fig. 9.2g mostra la ricostruzione nel caso in cui l'inclinazione da A a B diminuisce e poi da B a C aumenta; la Fig. 9.2h mostra la ricostruzione nel caso in cui l'inclinazione da A a B aumenta e poi da B a C diminuisce.

Questo procedimento sarà esteso a tutte le misure presenti lungo la traccia della sezione geologica (Fig. 9.3a), in questo modo l'andamento degli strati può essere disegnato da una giacitura all'altra.

Casi particolari si possono avere:

- a) quando due inclinazioni sono uguali, in questo caso gli strati avranno un andamento parallelo tra gli archi di cerchio adiacenti (Fig. 9.3b);

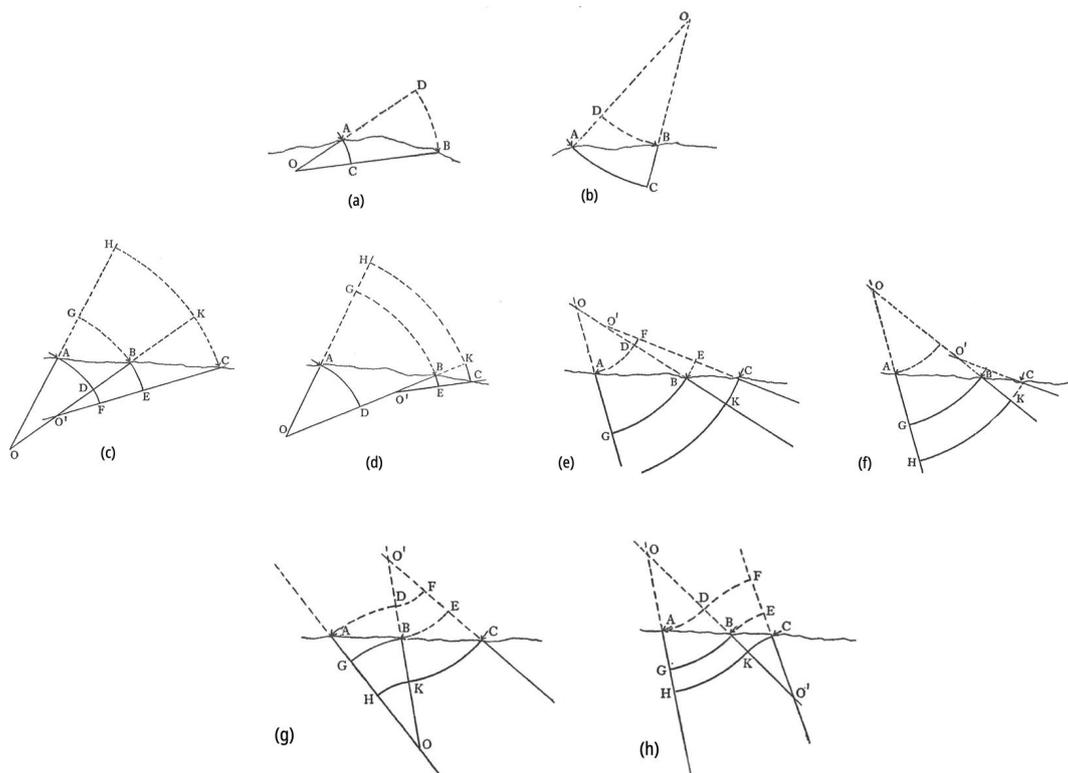


Figura 9.2 Costruzioni con il metodo degli archi di cerchio. (a) Costruzione tra due misure nel caso di una antiforme. (b) Costruzione tra due misure nel caso di una sinforme. (c, d) Costruzione con tre misure di inclinazione crescente, nel caso di una antiforme. (e, f) Costruzione con tre misure di inclinazione crescente, nel caso di una sinforme.

- b) quando due misure hanno un'inclinazione che differisce di pochi gradi, il centro del cerchio in questo caso si troverà ad una distanza molto grande dalla sezione e sarà impossibile disegnarlo. In questo caso, illustrato in Fig. 9.3c, bisogna:
- c) tracciare la retta AC che rappresenta la giacitura della stratificazione e la retta AE, perpendicolare a CD (CD è la retta ortogonale all'altra misura);
- d) trovare la bisettrice dell'angolo CAE, che interseca la retta CD nel punto G;
- e) costruire la retta GF perpendicolare a CD;
- f) il punto G è l'intersezione dell'arco di cerchio che parte dal punto A con la retta CD, l'arco di cerchio può quindi essere tracciato manualmente da A a G aiutandoci dal fatto che l'arco deve essere tangente con le rette AF e FG.

Sezioni geologiche costruite con questo metodo mostrano le seguenti particolarità:

- a) tutti gli strati mantengono spessore costante;
- b) tutte le pieghe hanno una forma lobata all'estradosso e forma a cuspidate all'intradosso (Fig. 9.3a), questo provoca un'improvvisa variazione delle giaciture nell'intradosso delle pieghe e una non conservazione della lunghezza degli strati;
- c) l'ampiezza delle pieghe diminuisce allontanandoci dalla superficie topografica (dove sono ubicate le misure utilizzate per la costruzione);
- d) all'intradosso delle pieghe si possono avere variazioni di giacitura molto repentine che porta a problemi geometrici di incompatibilità e all'impossibilità di mantenere costante lo spessore degli strati, in questo caso la sezione geologica deve essere

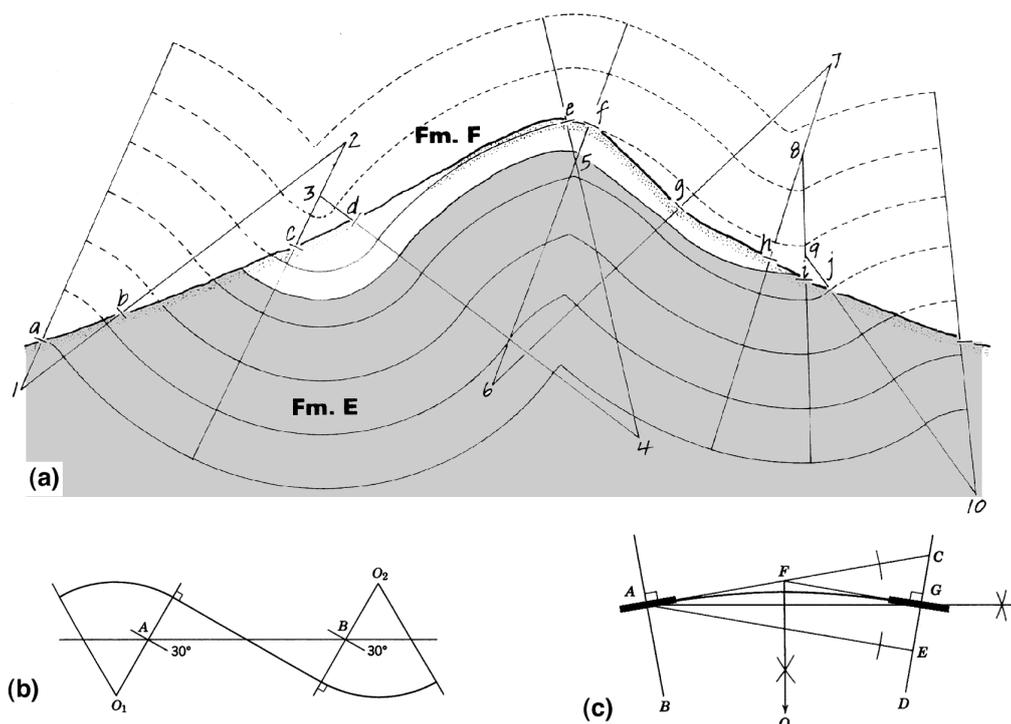


Figura 9.3 (a) Metodo di Busk per la ricostruzione dell'andamento di un contatto. La formazione sottostante è rappresentata in grigio (b) Costruzione tra due giaciture parallele. (c) Costruzione tra due giaciture (nel punti A e nel punto G) con una minima variazione di inclinazione.

completata a mano libera.

Tutte queste particolarità fanno sì che la geometria delle pieghe costruite con questo metodo si avvicini solo parzialmente alla geometria reale delle pieghe; nonostante queste limitazioni il Metodo di Busk è comunque utile per la realizzazione di sezioni geologiche in terreni non metamorfici o comunque non molto deformati.

9.3 Metodo delle bisettrici

Anche questo metodo per la realizzazione di sezioni geologiche (COATES, 1945; GILL, 1953; SUPPE, 1985) assume che tutte le pieghe presenti in carta abbiano fianchi con uguale spessore, ma piuttosto che avere una cerniera arrotondata come assunto nel Metodo di Busk, si suppone che siano delle pieghe a *kink* (o a *chevron*), cioè pieghe con fianchi rettilinei e cerniere a cuspide. Sul terreno pieghe con questa geometria si riconoscono in quanto per ampie aree si hanno inclinazioni costanti degli strati, che in breve spazio cambiano di orientazione (Fig. 9.4).

Pieghe a *kink* con fianchi di uguale spessore hanno necessariamente il piano assiale bisettore tra i due fianchi della piega (cioè $\gamma_1 = \gamma_2$ in Fig. 9.4). Nella pratica se ci sono sufficienti misure per definire l'inclinazione dei fianchi della piega, è possibile tracciare il piano assiale della piega e in questo modo conoscendo lo spessore di tutte le formazioni coinvolte nel piegamento si può ricostruire tutta la piega. Dettagli per la costruzione del piano assiale sono riportati in Fig. 9.5.

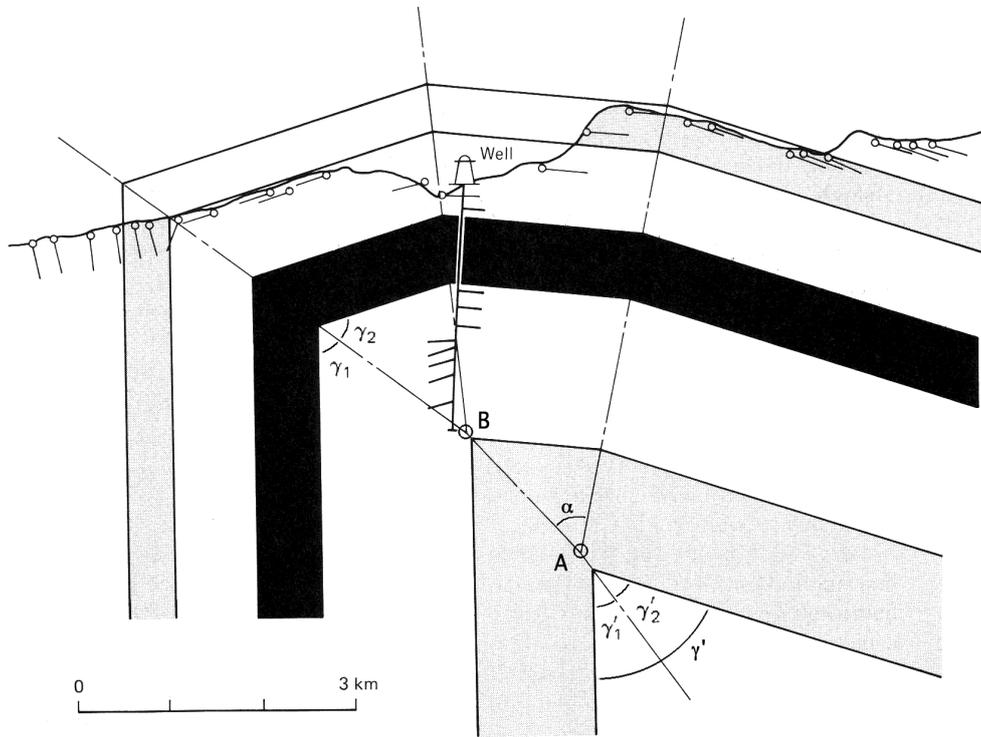


Figura 9.4 Costruzione di una sezione geologica con il metodo delle bisettrici. Si noti che per conservare lo spessore degli strati in entrambi i fianchi il piano assiale deve essere bisettore dei due fianchi, cioè $\gamma_1 = \gamma_2$ e $\gamma'_1 = \gamma'_2$ e non bisettore dell'angolo α .

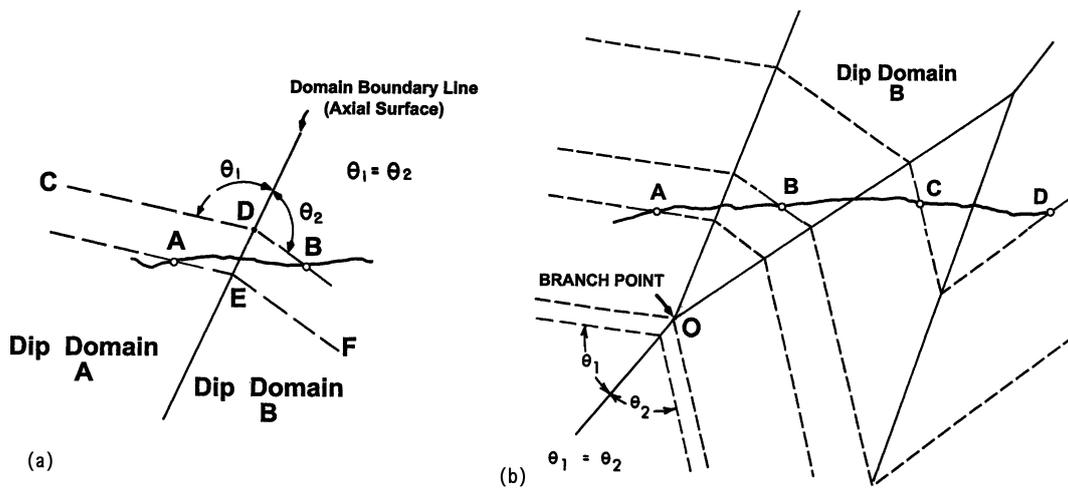


Figura 9.5 Costruzione della superficie assiale (piano assiale) con il metodo delle bisettrici. In (b) *branch point* è il punto dove si incontrano due piani assiali.

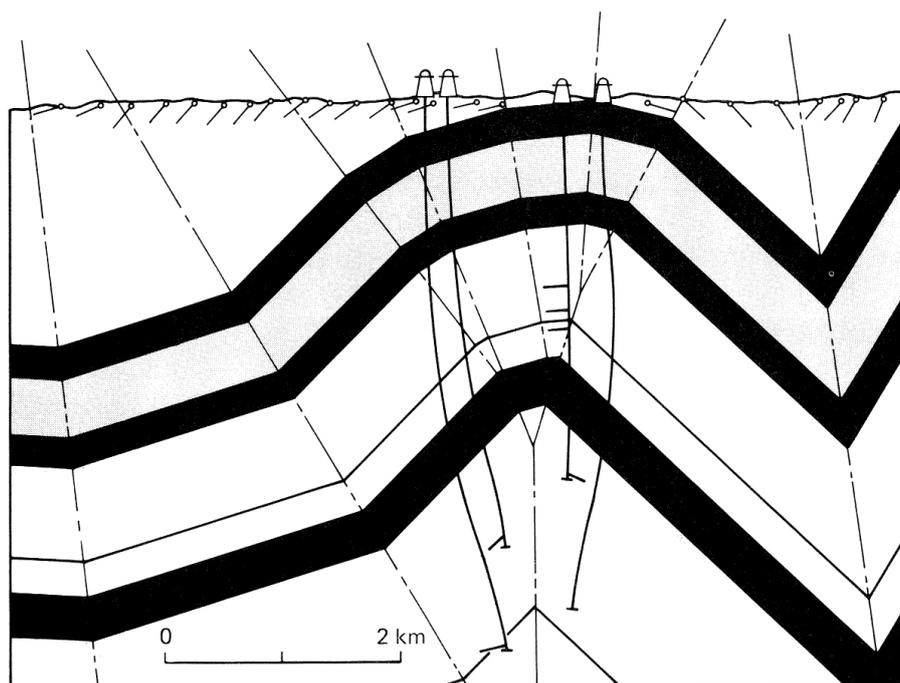


Figura 9.6 Piega con cerniera arrotondata ricostruita approssimandola ad una serie di pieghe a kink.

È importante notare che se due piani assiali si incontrano si svilupperà una sola singola superficie assiale, che nuovamente deve soddisfare la relazione $\gamma_1 = \gamma_2$, cioè essere bisettrice tra i due fianchi. Piani assiali che si incontrano con la formazione di un nuovo solo piano assiale sono illustrati in Fig. 9.4, A e B sono due punti dove i piani assiali si incontrano. Nel caso dei due piani assiali che si incontrano nel punto A, va notato che il nuovo piano assiale che si sviluppa verso il basso dovrà essere bisettore dell'angolo γ' e non dell'angolo α .

Questo metodo può essere applicato anche a pieghe che non hanno una vera e propria geometria a chevron (Fig. 9.6). Questo può essere fatto perché una superficie curva può essere approssimata con una linea spezzata, a cui può essere applicato questo metodo. Una volta costruita la sezione con questo metodo, successivamente a mano possono essere "lisciati" i contatti.

Questo metodo e il Metodo di Busk producono il solito risultato con pieghe concentriche, perché in questo caso il piano assiale della piega a kink corrisponde alla normale agli strati nella zona di massima curvatura nel Metodo di Busk. Sia con questo metodo che con il Metodo di Busk la costruzione della sezione è molto facilitata se si conoscono gli spessori delle varie formazioni affioranti.

Un modo pratico molto semplice per disegnare i contatti in modo tale che gli spessori delle formazioni siano conservati è illustrato in Fig. 9.7. Su una striscia di carta millimetrata si riportano gli spessori delle formazioni (con le rispettive sigle), questa striscia di carta può essere spostata e tenuta sempre ortogonale alla giacitura degli strati (ricavata da misure in superficie o ricavata con il Metodo di Busk o delle bisettrici), in questo modo si ha la posizione degli altri contatti in profondità. Unendo la posizione dei contatti in profondità così determinata si ottengono sezioni in cui lo spessore delle formazioni è costante.

In pratica i passi da seguire per la realizzazione di una sezione geologica applicando il

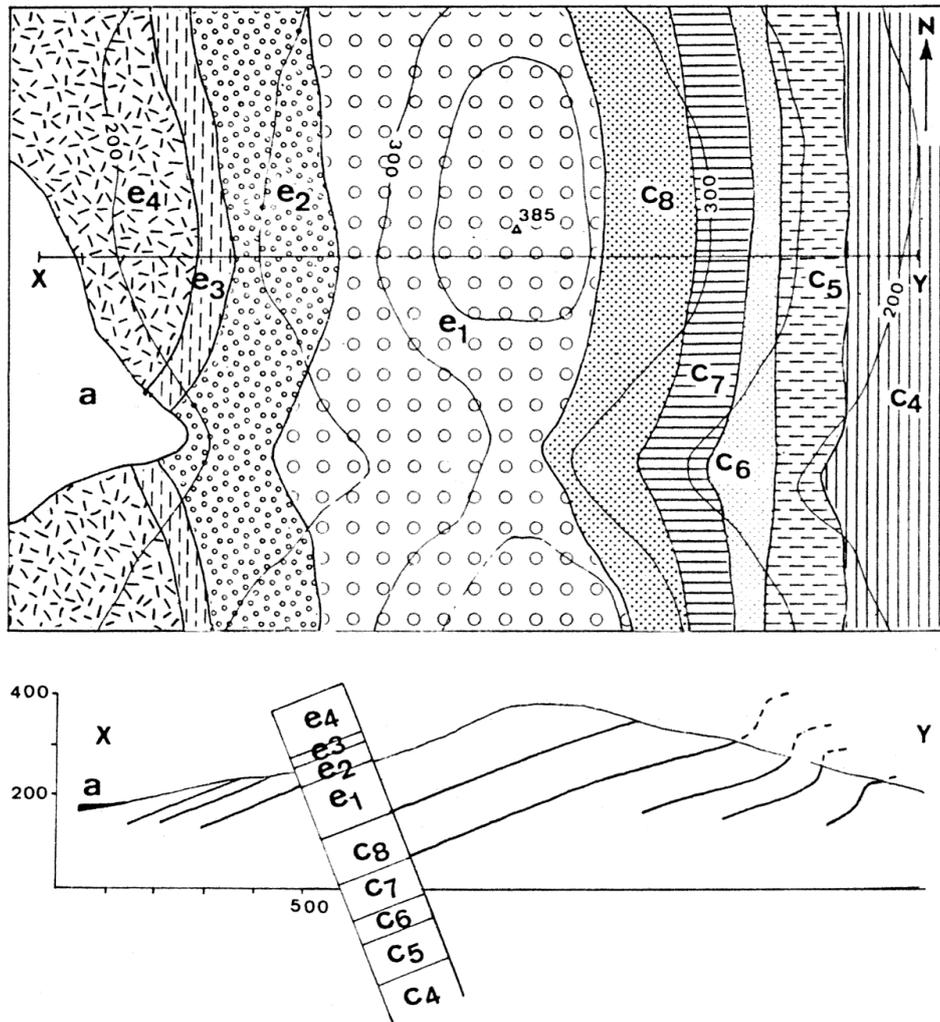


Figura 9.7 Costruzione di una sezione geologica quando sono noti gli spessori delle formazioni.

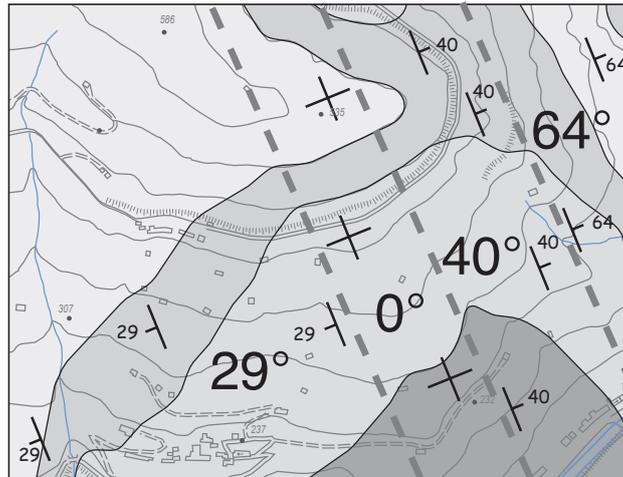


Figura 9.8 Carta geologica di un'area in cui sono presenti pieghe a kink. Le linee a tratteggio separano domini omogenei, cioè aree in cui la stratificazione ha giacitura costante.

metodo delle bisettrici sono:

- a) Lettura dell'intera carta geologica, per avere un'idea preliminare delle strutture presenti (anticlinali, sinclinali, faglie dirette, sovrascorrimenti, discordanze, ecc.).
- b) Individuare i domini omogenei, cioè le aree con giaciture costanti degli strati. I limiti tra i domini omogenei vanno riportati in carta (i limiti sono riportati con linee tratteggiate nell'esempio di [Fig. 9.8](#) e di [Fig. 9.9a](#)) e sulla sezione geologica ([Fig. 9.9b](#)), questi limiti rappresentano le tracce dei piani assiali delle pieghe.
- c) Si considerano due domini omogenei adiacenti e si calcola l'inclinazione della bisettrice tra le due giaciture, cioè la giacitura del piano assiale della piega, come indicato in [Fig. 9.9c](#).
- d) Il piano assiale, con la giacitura così trovata, si riporta sulla sezione geologica ([Fig. 9.9c](#)).
- e) Si ripete la solita procedura per altri due domini omogenei adiacenti, disegnando in questo modo un altro piano assiale.
- f) Si disegna a questo punto la giacitura della stratificazione (e le varie formazioni) tra i due piani assiali.
- g) Si ripete per tutti i domini omogenei fino alla fine sezione geologica ([Fig. 9.9d](#)).

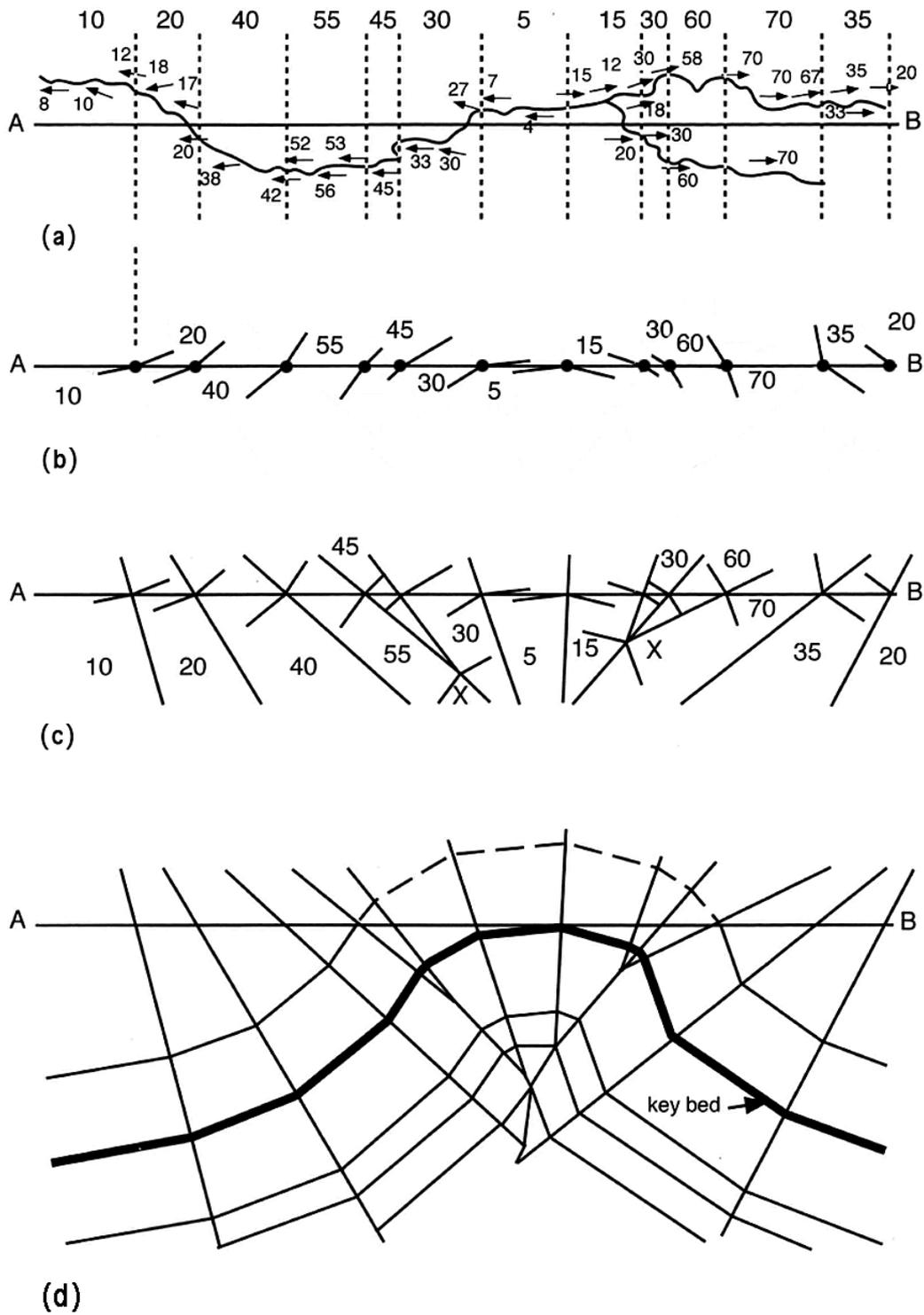


Figura 9.9 Vari stadi per la realizzazione di una sezione geologica con il metodo delle bisettrici.

Profili geologici

Un *profilo geologico* è la *rappresentazione di strutture geologiche su un piano inclinato*, a differenza di una *sezione geologica* che è la rappresentazione delle strutture geologiche su un piano verticale (Fig. 10.1). La costruzione di un profilo può risultare utile quando si vogliono rappresentare strutture geologiche inclinate. Nel caso di strutture a pieghe la costruzione di un profilo geologico ortogonale all'asse delle pieghe è utile e spesso usata in quanto ha il vantaggio di rappresentare la vera forma delle pieghe, con i corretti spessori degli strati, angoli di apertura delle pieghe, ecc. È evidente che nel caso di una piega con asse orizzontale sezione geologica e profilo geologico coincidono. Come per le sezioni geologiche, profili geologici possono essere costruiti se le pieghe presenti nella carta geologica e che devono essere proiettate, sono di tipo cilindrico.

Per realizzare un profilo bisogna stabilire la traccia del profilo e l'inclinazione del profilo rispetto alla verticale (es. ortogonale all'asse di eventuali pieghe), di conseguenza è stabilita anche la direzione di proiezione che è ortogonale al piano del profilo. Ogni punto sulla carta geologica deve essere riportato sul profilo tenendo conto della costruzione di Fig. 10.1c, il punto deve essere trasferito sul profilo seguendo la direzione di proiezione e ad una quota x' rispetto ad una superficie orizzontale di riferimento, che può essere il livello del mare (l.m.) se si fa uso delle quote riportate sulla carta topografica. La quota x' sul profilo geologico è funzione della:

- a) quota del punto sulla carta geologica (h);

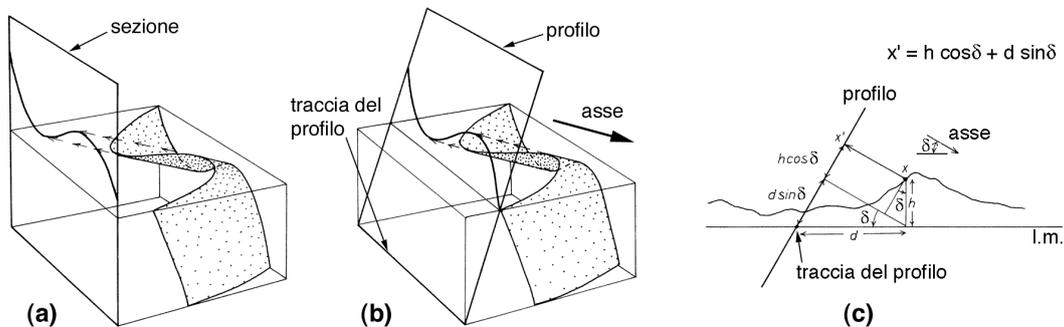


Figura 10.1 (a) Sezione geologica di una superficie piegata. (b) Profilo geologico di una struttura piegata, il profilo è inclinato in modo tale da essere ortogonale all'asse della piega. (c) Proiezione di un punto x su un profilo geologico. Il punto sarà ad una quota x' rispetto al livello di riferimento (l.m.).

- b) inclinazione della direzione di proiezione (δ);
- c) della distanza del punto dalla traccia del profilo (d).

Dalla Fig. 10.1c si vede come

$$x' = h \cos \delta + d \sin \delta \quad (10.1)$$

Una volta riportati sufficienti punti dalla carta geologica sul profilo (es. punti dati dall'intersezione di un contatto con una isoipsa) questi possono essere interpolati e può essere disegnato il profilo.

Come esempio di questa costruzione, nella Fig. 10.2 è raffigurata una carta geologica in una zona con pieghe cilindriche ad asse inclinato, un profilo geologico in questa area costruito secondo indicazioni sopra riportate è illustrato in Fig. 10.3.

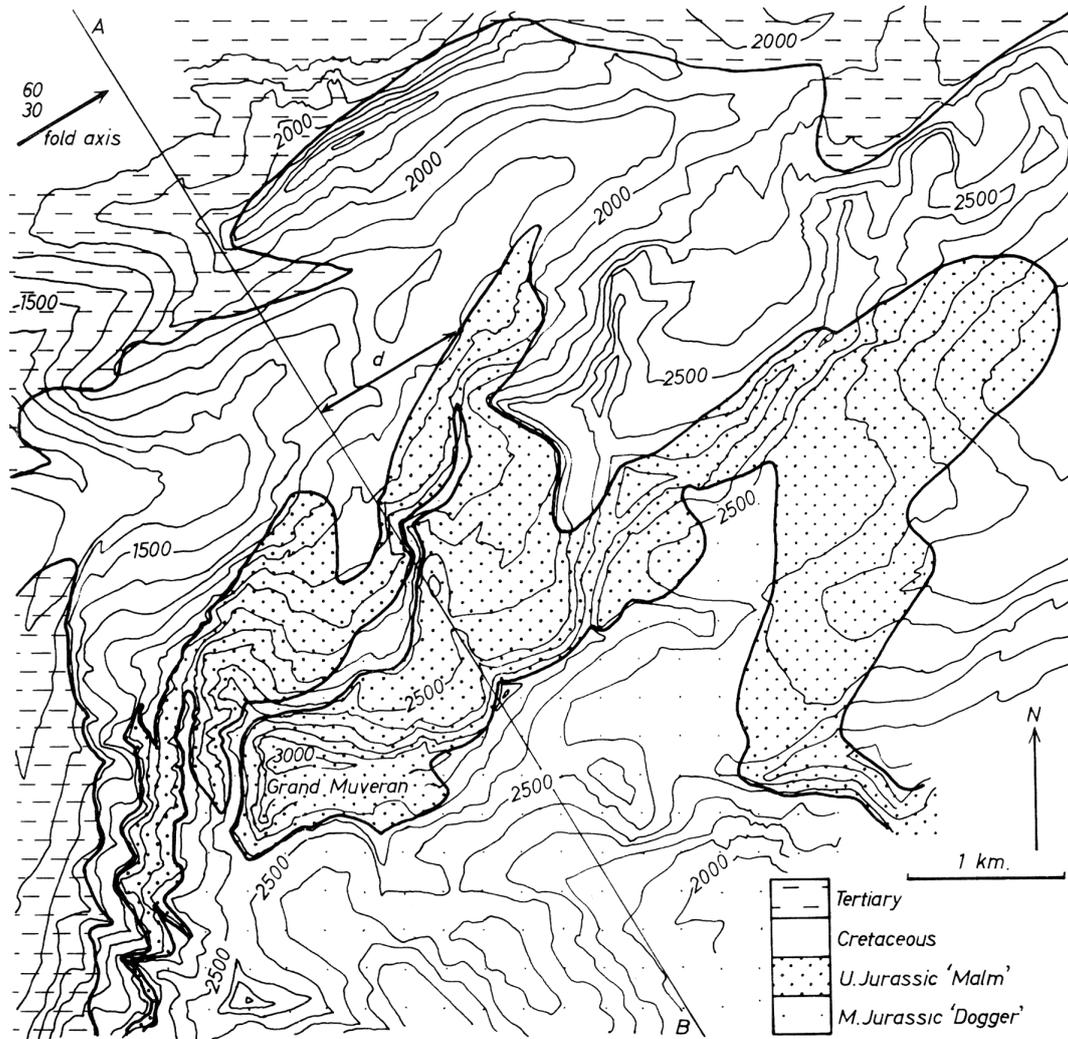


Figura 10.2 Carta geologica semplificata in cui si vuole costruire un profilo geologico (da RAMSAY & HUBER, 1987). Nell'area sono presenti pieghe cilindriche con asse orientato 60/30, il profilo quindi avrà direzione N150°E e inclinazione di 30° rispetto alla verticale. La traccia del profilo geologico è la linea A-B, la quota della traccia del profilo è zero, cioè è sul livello del mare. Il profilo geologico risultante è illustrato in Fig. 10.3.

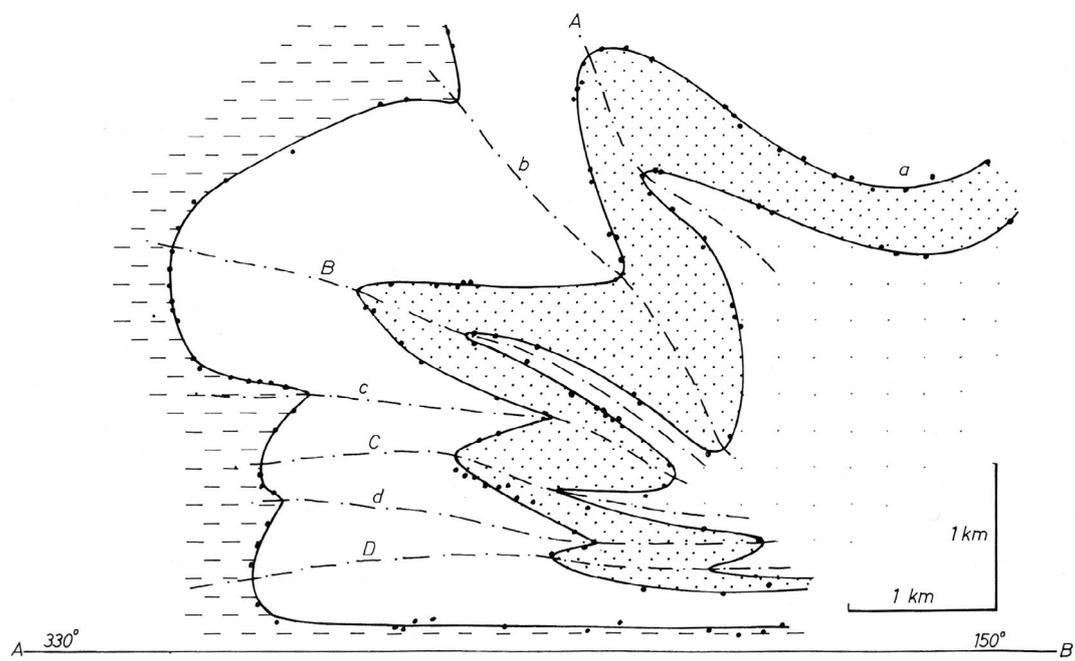


Figura 10.3 Profilo attraverso la carta geologica di Fig. 10.2. Ogni punto usato nella costruzione del profilo corrisponde nella carta geologica all'intersezione del contatto stratigrafico con un'isoipsa.

Appendici

A

Pieghe in proiezione stereografica

A.1 Pieghe cilindriche

Se si riportano in proiezione stereografica le misure raccolte in un'area interessata da piegamento (Fig. A.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. A.2a). 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. A.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. A.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. A.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. A.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.

A.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. A.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. A.3). In proiezione stereografica l'angolo di apertura è

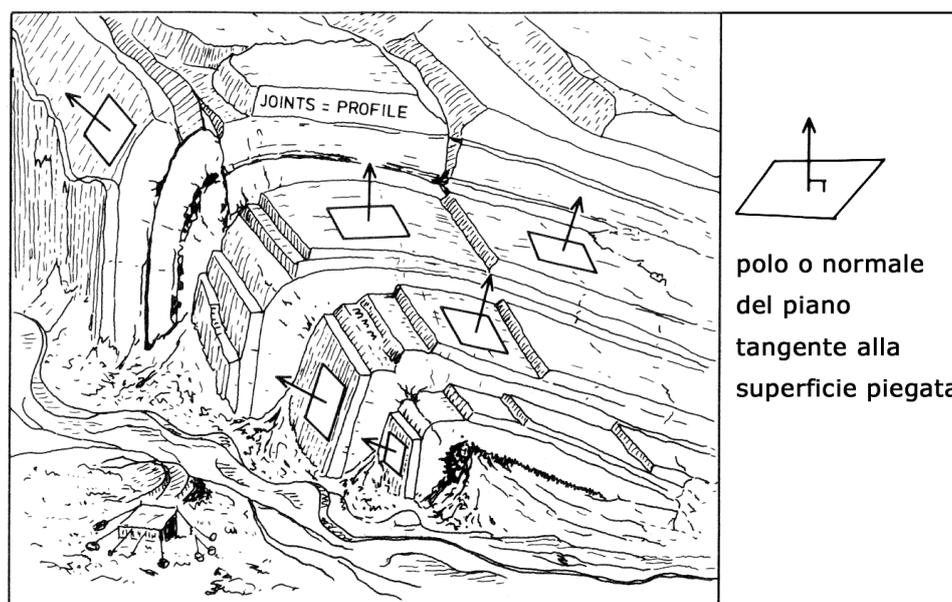


Figura A.1 Piega in affioramento, sono indicati i piani tangenti alla stratificazione che rappresentano le misure raccolte in campagna. Queste misure sono successivamente riportate in proiezione stereografica.

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. A.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. A.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.

Supponiamo di volere determinare esattamente la giacitura (immersione/inclinazione) del piano assiale della piega 2 di Fig. A.3a di cui conosciamo solo approssimativamente l'orientazione, circa verticale. Si procede nel seguente modo:

- si proiettano in uno stereogramma (Fig. A.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. A.3b e in Fig. A.3c);
- all'interno dell'angolo di apertura β si ricava il punto mediano (punto M in Fig. A.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.

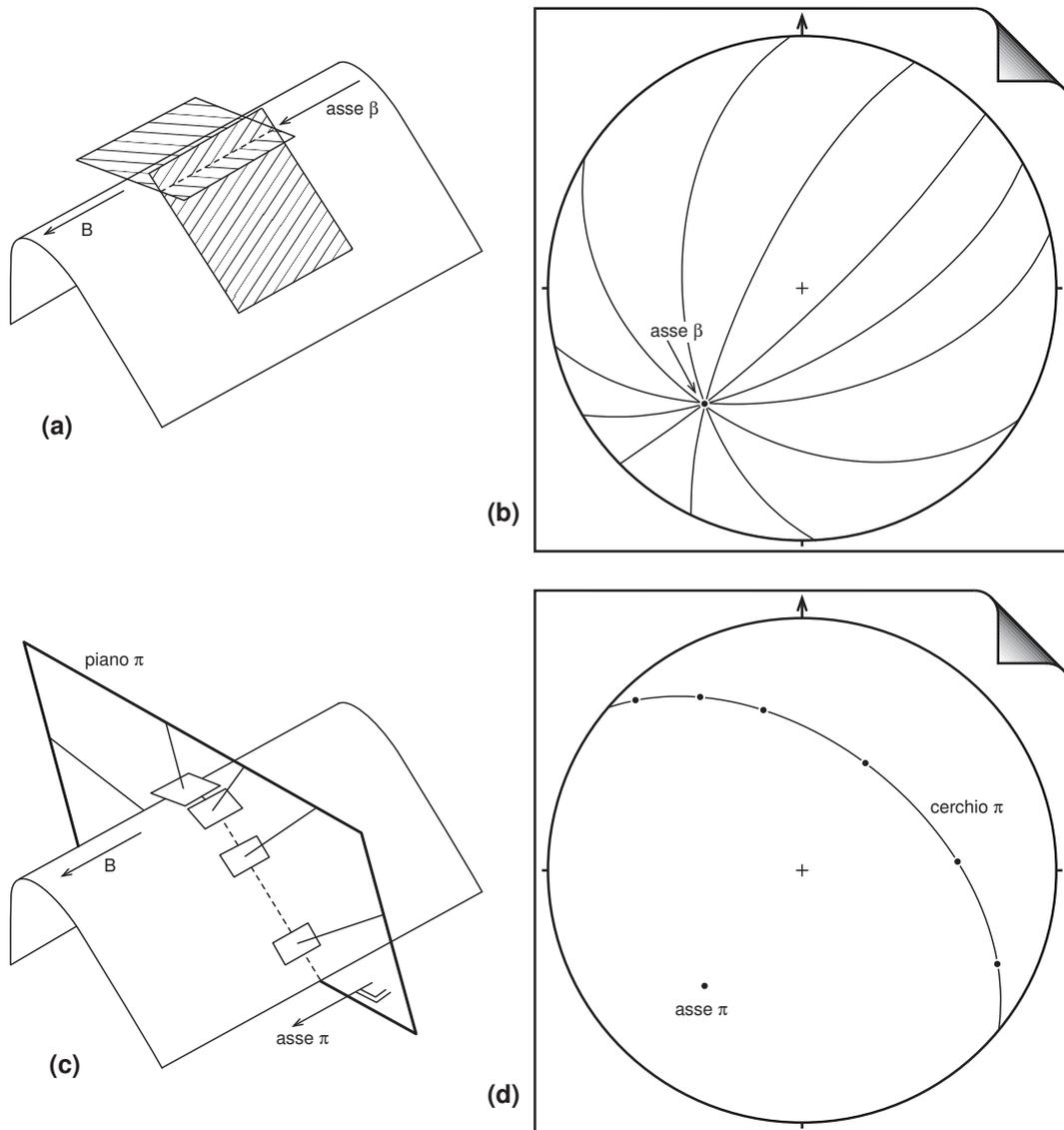


Figura A.2 (a) Piega cilindrica, sono rappresentati due piani tangenti alla superficie piegata. B è l'asse della piega. (b) Costruzione dell'asse β di una piega. (c) Piega cilindrica, con riportate le direzioni ortogonali alla superficie piegata. (d) Costruzione del cerchio π per una piega. Si noti che B, β e π rappresentano il solito elemento geometrico (l'asse della piega), varia solo il modo di determinarlo.

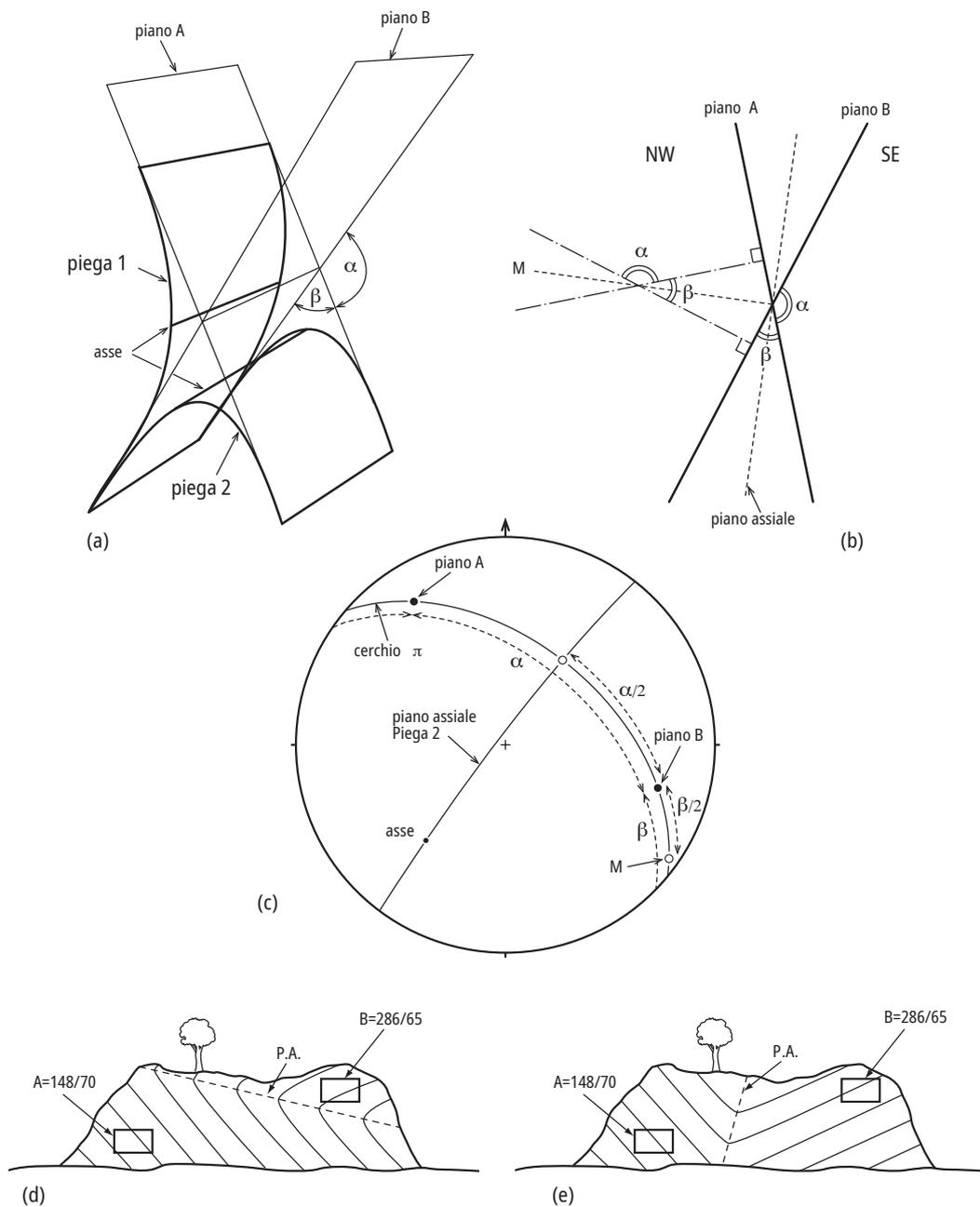


Figura A.3 (a) Angolo di apertura di due pieghe. α è l'angolo di apertura della piega 1, β è l'angolo di apertura della piega 2. (b) Sezione verticale attraverso i due piani. (c) Angoli di apertura in proiezione stereografica. Il piano A=148/70, B=286/65. (d), (e) Due affioramenti con le solite misure. Si noti come con le solite misure siano possibili due pieghe con giacitura nettamente diversa, una con piano assiale suborizzontale e una con piano assiale subverticale. In proiezione stereografica le due pieghe non sono tra loro distinguibili, è necessaria l'osservazione in campagna dell'orientazione del piano assiale per sapere in quale dei due casi siamo.

Tabella A.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°

A.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. A.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. A.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. A.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. A.4](#) si vede come nel caso di pieghe "a cuspidate" (cerniere non arrotondate, [Fig. A.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. A.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. A.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.

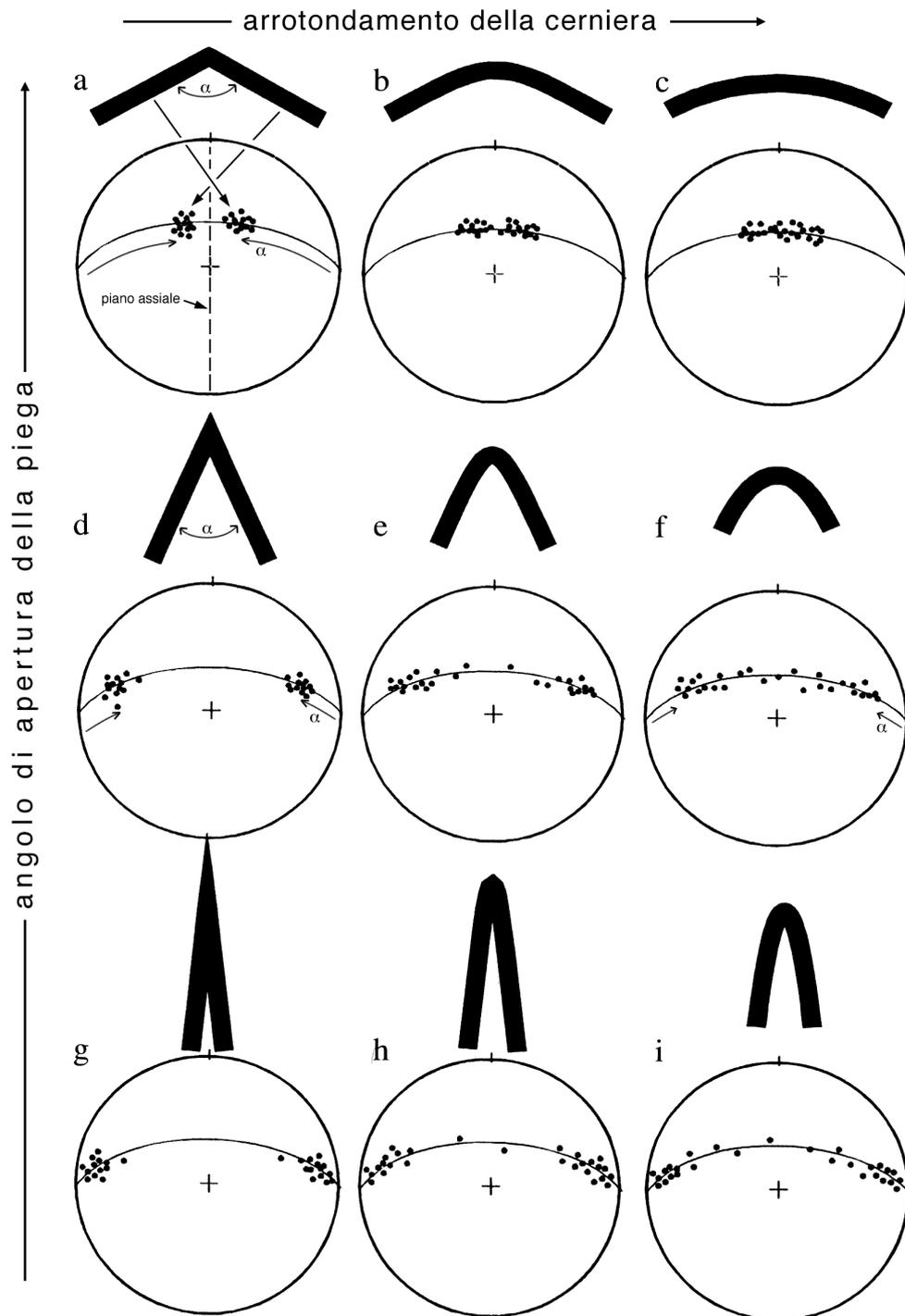


Figura A.4 Vari tipi di pieghe con angolo di apertura e grado di arrotondamento della cerniera differente, e relative proiezioni stereografiche. α è l'angolo di apertura della piega.

A.4 Orientazione di pieghe

Oltre a quelli già visti nel [Capitolo A.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. A.5](#) mostra le possibili orientazioni di pieghe. La [Fig. A.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. A.7a](#)). Allo stesso tempo è importante ricordare che fianchi di una piega chiusa o serrata hanno dei massimi in proiezione stereografica molto ravvicinati ([Fig. A.7b](#)) e che si sovrappongono nel caso di pieghe isoclinali.

Combinando le possibili orientazioni dell'asse di una piega ([Fig. A.6a, b, c](#)) con le possibili orientazioni del piano assiale ([Fig. A.6d, e, f](#)) si ottengono le proiezioni stereografiche per:

- a) pieghe con asse orizzontale e piano assiale verticale ([Fig. A.8a](#));
- b) pieghe con asse inclinato e piano assiale verticale ([Fig. A.8b](#));
- c) pieghe con asse verticale e piano assiale verticale ([Fig. A.8c](#));
- d) pieghe con asse orizzontale e piano assiale inclinato ([Fig. A.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. A.8e](#));
 - ii. il caso particolare in cui la direzione del piano assiale è ortogonale rispetto alla direzione dell'asse ([Fig. A.8f](#));
- f) pieghe con asse orizzontale e piano assiale inclinato ([Fig. A.8g](#)).

Dalla [Fig. A.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. A.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. A.9b](#) e dalla [Fig. A.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;

		Orientazione dell'asse		
		orizzontale	inclinato	verticale
Orientazione del piano assiale	verticale			
	inclinato		 direzione del piano assiale obliqua rispetto alla direzione dell'asse direzione del piano assiale ortogonale rispetto alla direzione dell'asse	
	orizzontale		non è possibile	

Figura A.5 Possibili orientazioni di pieghe al variare della giacitura dell'asse e del piano assiale.

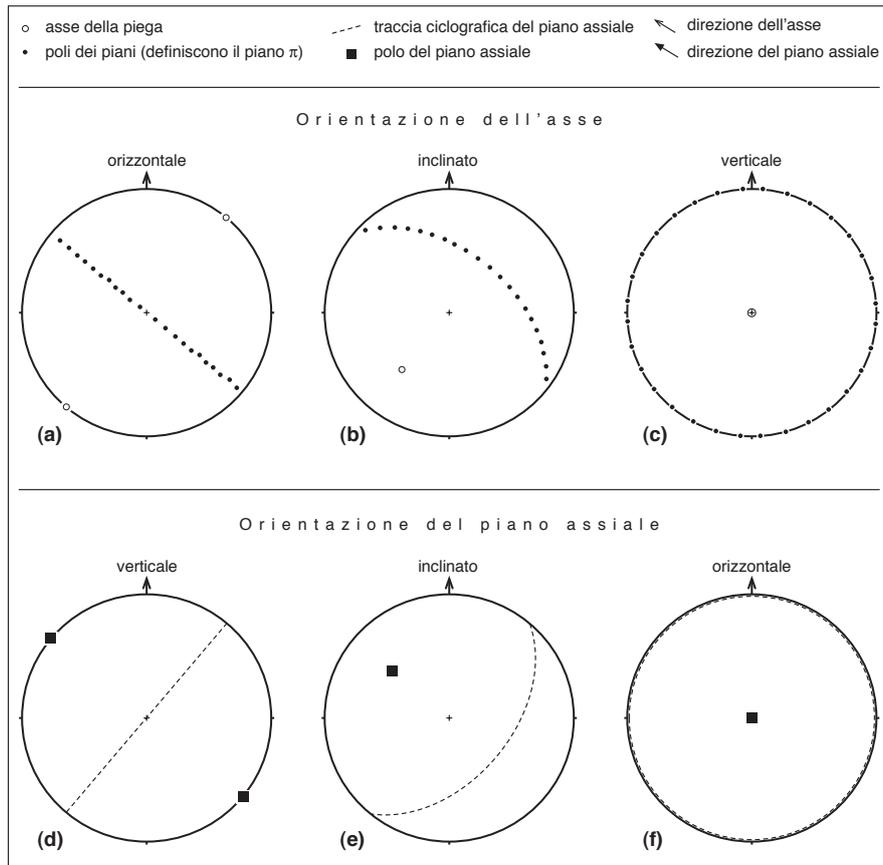


Figura A.6 Proiezioni stereografiche per pieghe con asse (a, b, c) e piano assiale (d, e, f) variamente inclinato.

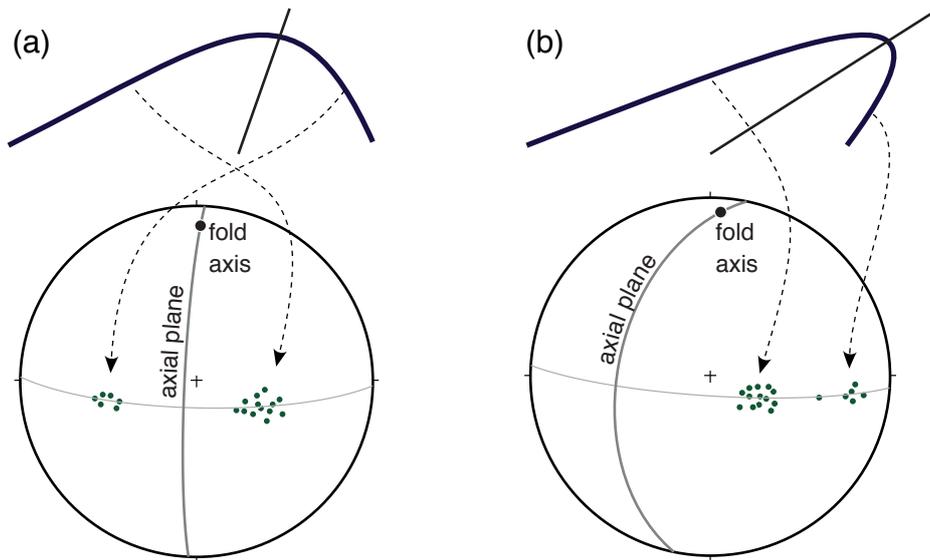


Figura A.7 Determinazione dell'orientazione piano assiale di una piega in proiezione stereografica. (a) Piega inclinata (piano assiale inclinato), (b) piega rovesciata (piano assiale inclinato, un fianco rovesciato). Si noti la posizione dei massimi delle misure raccolte nei due fianchi, in quanto si riportano le misure come poli dei piani.

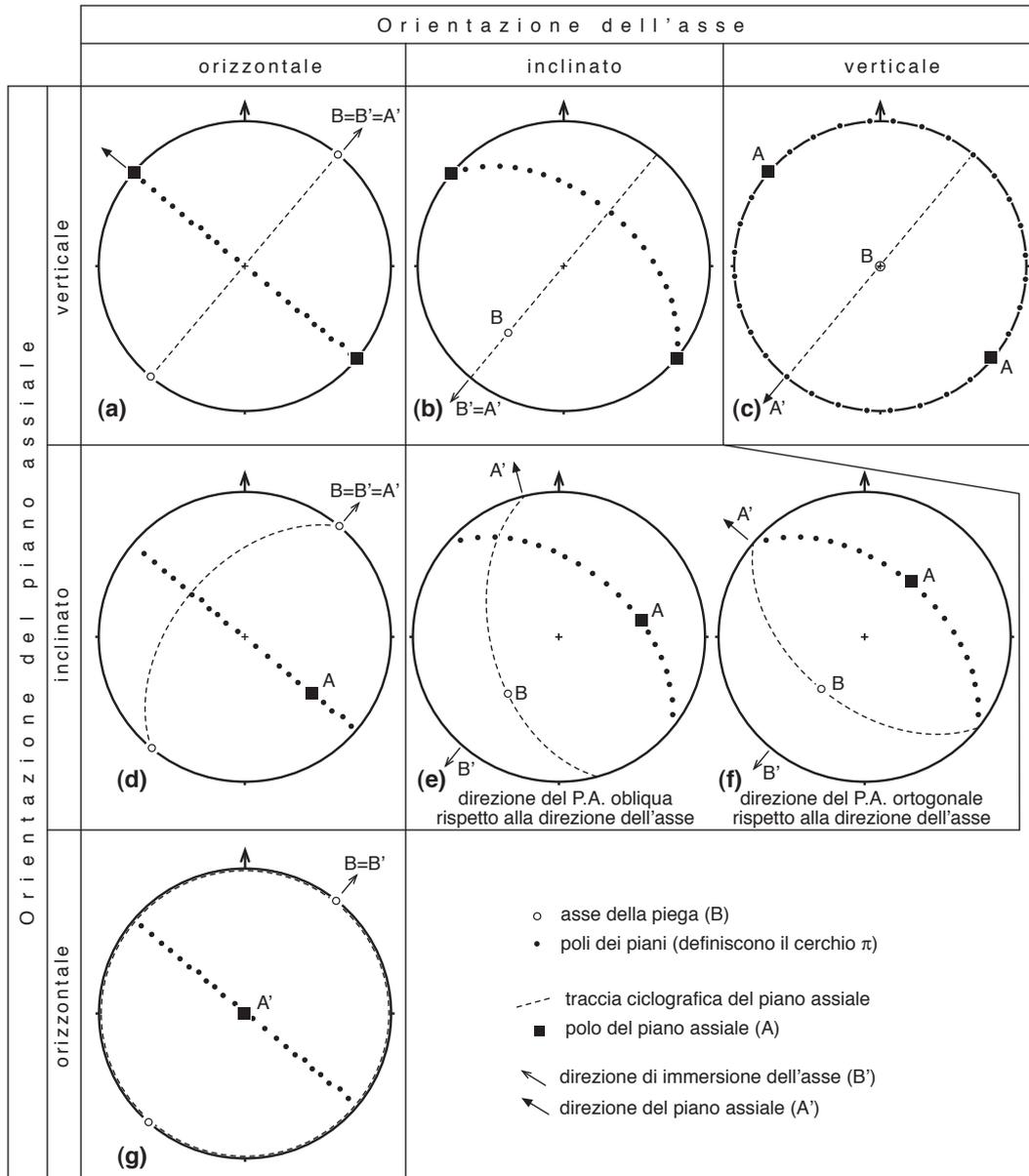


Figura A.8 Possibili proiezioni stereografiche per pieghe con varie orientazioni dell'asse e del piano assiale.

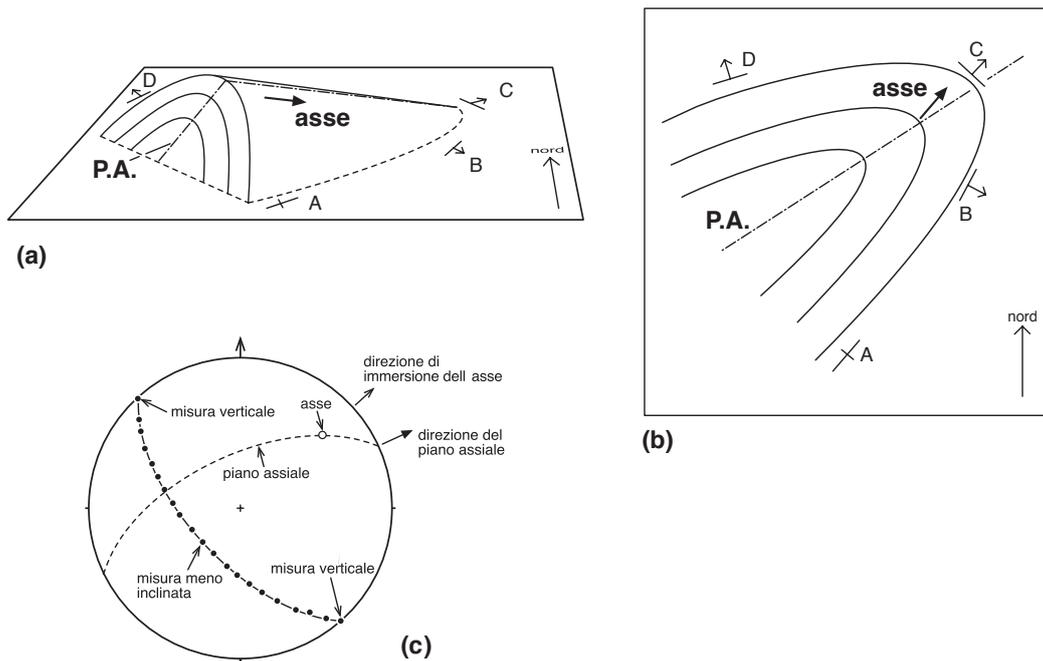


Figura A.9 (a) Piegia con asse inclinato e piano assiale inclinato. (b) La solita piegia in una carta geologica. (c) Rappresentazione stereografica degli elementi della piegia.

- b) nella carta geologica la traccia del piano assiale (P.A. in Fig. A.9b) avrà un andamento differente rispetto alla direzione di immersione dell'asse;
- c) se la piegia ha un fianco verticale, la direzione (*strike*) della misura verticale (misura A) è anche la direzione di immersione dell'asse della piegia;
- d) se la piegia 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 piegia.

B

Ricostruzione di superfici geologiche

B.1 Superfici geologiche da dati di sottosuolo

Spesso oltre ad informazioni geologiche di superficie è possibile disporre di informazioni geologiche che derivano da sondaggi o da pozzi minerari, anche questi dati permettono di stabilire la geometria di corpi geologici nel sottosuolo. Vediamo come questi dati possono essere elaborati con un esempio.

In Fig. B.1a sono illustrati tre pozzi che attraversano un livello di carbone, che per semplicità considereremo piano; per ogni pozzo sono disponibili le informazioni riportate in Tab. Tab. B.1.

Per ogni pozzo si conosce l'altezza, cioè la posizione, sulla superficie topografica (Fig. B.1b) e la profondità a cui si incontra il tetto del livello di carbone. In corrispondenza del pozzo a il tetto del livello di carbone sarà quindi a quota 250 m (350-100), mentre per il pozzo b sarà a quota 200 m e il pozzo c a quota 350 m. Se si assume che il livello di carbone sia una superficie planare inclinata, il tetto del livello di carbone dal pozzo a al pozzo b passa da 250 m a 200 m, dal pozzo b al pozzo c aumenta da 200 m a 350 m e dal pozzo c al pozzo a diminuisce di quota da 350 m a 250 m.

Se nella carta geologica dividiamo la distanza a-c in due parti troveremo la posizione della quota di 300 m (punto nero in Fig. B.1c), allo stesso modo se dividiamo la distanza b-c in tre parti uguali possiamo stabilire la posizione delle quote 250 m e 300 m. Tutti i punti così ricavati ci danno informazioni sulla quota della superficie geologica in esame, cioè del tetto del livello di carbone. Se si uniscono con delle rette i punti con uguale quota (Fig. B.1d), avremo costruito una carta a curve di livello del tetto della nostra superficie geologica, da cui è possibile determinare in modo esatto immersione e inclinazione della

Tabella B.1 Dati relativi a tre pozzi (vedi Fig. B.1). La profondità è la profondità del tetto del livello di carbone, a partire dalla superficie topografica.

<i>pozzo</i>	<i>quota inizio pozzo, in m s.l.m.</i>	<i>profondità</i>
a	350 m	100 m
b	300 m	100 m
c	450 m	100 m

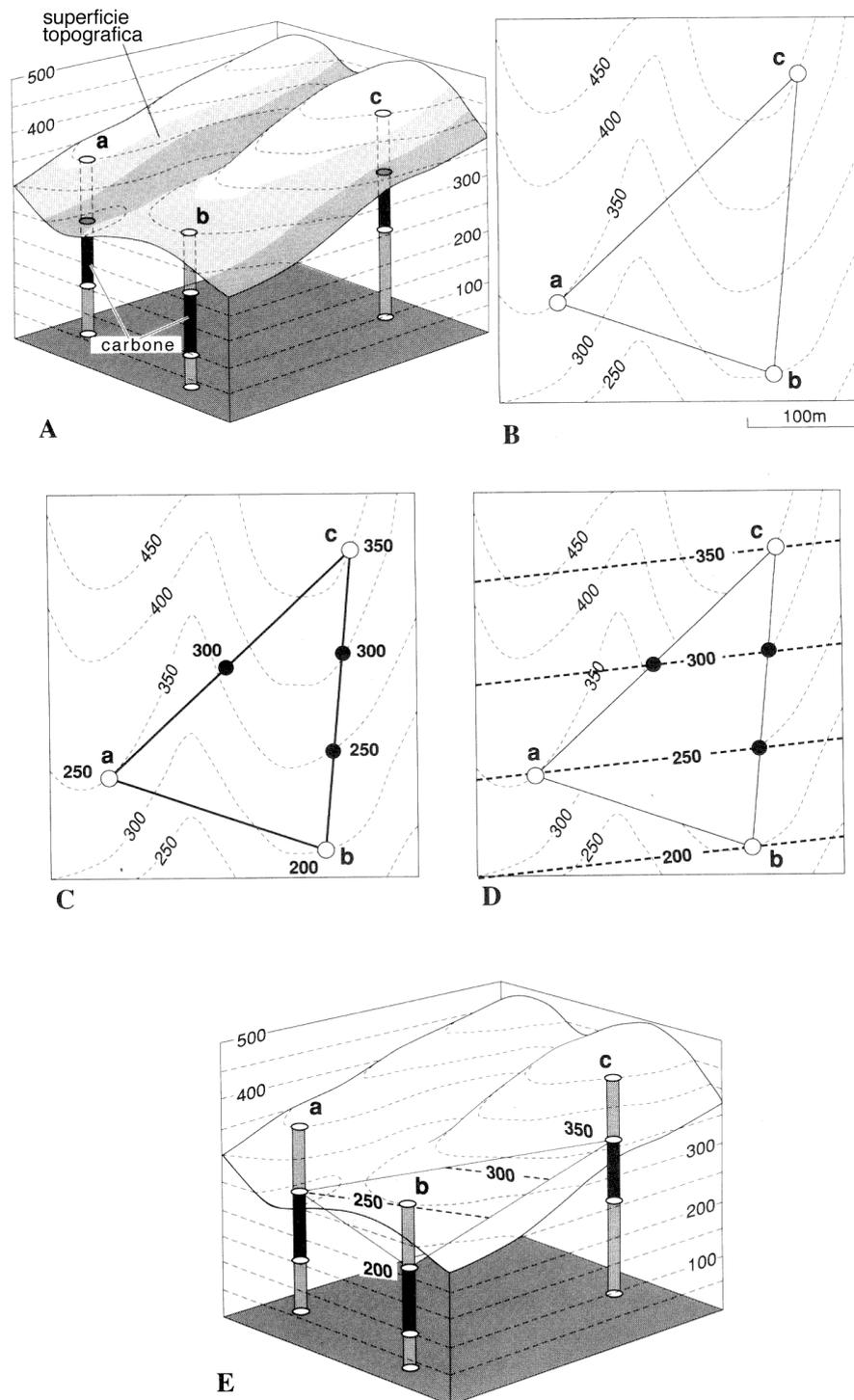


Figura B.1 Costruzione di una superficie geologica piana, es. il tetto di un livello di carbone, da informazioni da tre pozzi.

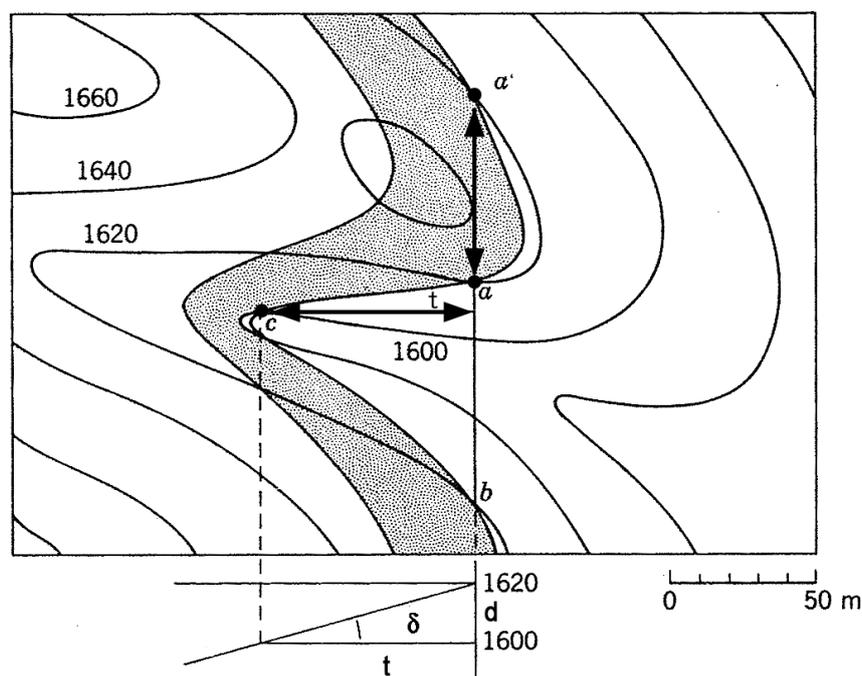


Figura B.2 Inclinazione e direzione di un contatto dall'andamento in carta.

superficie. La Fig. B.1e mostra questa superficie all'interno dello schema tridimensionale.

Quanto visto finora ci permette di affermare che con informazioni sulla quota in sottosuolo di tre punti non allineati su una superficie geologica, si può ricavare la giacitura di tale superficie, ammesso che essa sia piana.

B.2 Giacitura di contatti dalla carta geologica

Se uno strato o un contatto geologico inclinato è planare, cioè non è piegato, la sua giacitura può essere determinata dalla carta geologica se il contatto taglia in almeno tre punti le isoipse. Quando il contatto taglia in due punti la solita isoipse, come nei punti a e a' per il contatto di Fig. B.2: la linea che unisce i due punti è la direzione (*strike*) dello strato.

Per determinare l'inclinazione è necessario a questo punto misurare in carta una distanza tra due punti di elevazione nota sullo strato, ortogonalmente alla direzione dello strato. Questi punti possono essere i punti dove lo strato interseca isoipse differenti. In Fig. B.2 viene misurata la distanza t , tra la linea $a-b$ (linea di quota 1620) e il punto c di quota 1600. Se δ è l'inclinazione dello strato, t la distanza e h la differenza di quota, vale la reazione:

$$\tan \delta = \frac{h}{t} \quad (\text{B.1})$$

che permetterà di ricavare δ .

B.3 Contatti geologici da informazioni puntuali

Generalizzando quanto visto nel capitolo precedente si può affermare che se conosciamo la posizione e la quota di tre punti non allineati su una superficie geologica piana, si può

ricavare la giacitura (direzione e inclinazione) di tale superficie (ingl. *three-point problem*). Questo naturalmente vale anche se queste informazioni puntuali relative alla posizione e alla quota di un punto sono ricavate non in profondità, ma sulla superficie topografica.

In questo caso applicando le procedure viste nel capitolo precedente è possibile ricostruire l'andamento della superficie piana mediante curve di livello, ma soprattutto è possibile ricostruire anche i contatti geologici sulla superficie, cioè disegnare una vera e propria carta geologica. Vediamo con un esempio come questo sia possibile.

In Fig. B.3a è illustrata una carta topografica in cui sono riportati alcuni contatti osservati sul terreno. Sulla base di quanto visto nel capitolo precedente è possibile costruire l'andamento a curve di livello del contatto argille-conglomerati (punti di osservazione a, b, c) e del contatto arenarie-conglomerati (punti di osservazione d, e, f). Poiché si suppone che i contatti siano delle superfici piane, le curve di livello saranno delle linee rette come illustrato in Fig. B.3c. Dalla Fig. B.3c si vede inoltre che alcune rette che rappresentano le curve di livello sui contatti geologici tagliano le isoipse della carta topografica con la stessa quota (es. la retta 450 m taglia in quattro punti l'isoipsa di 450 m); i loro punti di incontro sono rappresentati dai punti bianchi di Fig. B.3d. Unendo in modo continuo i punti così trovati si può tracciare l'andamento dei vari contatti (Fig. B.3d) e costruire la carta geologica.

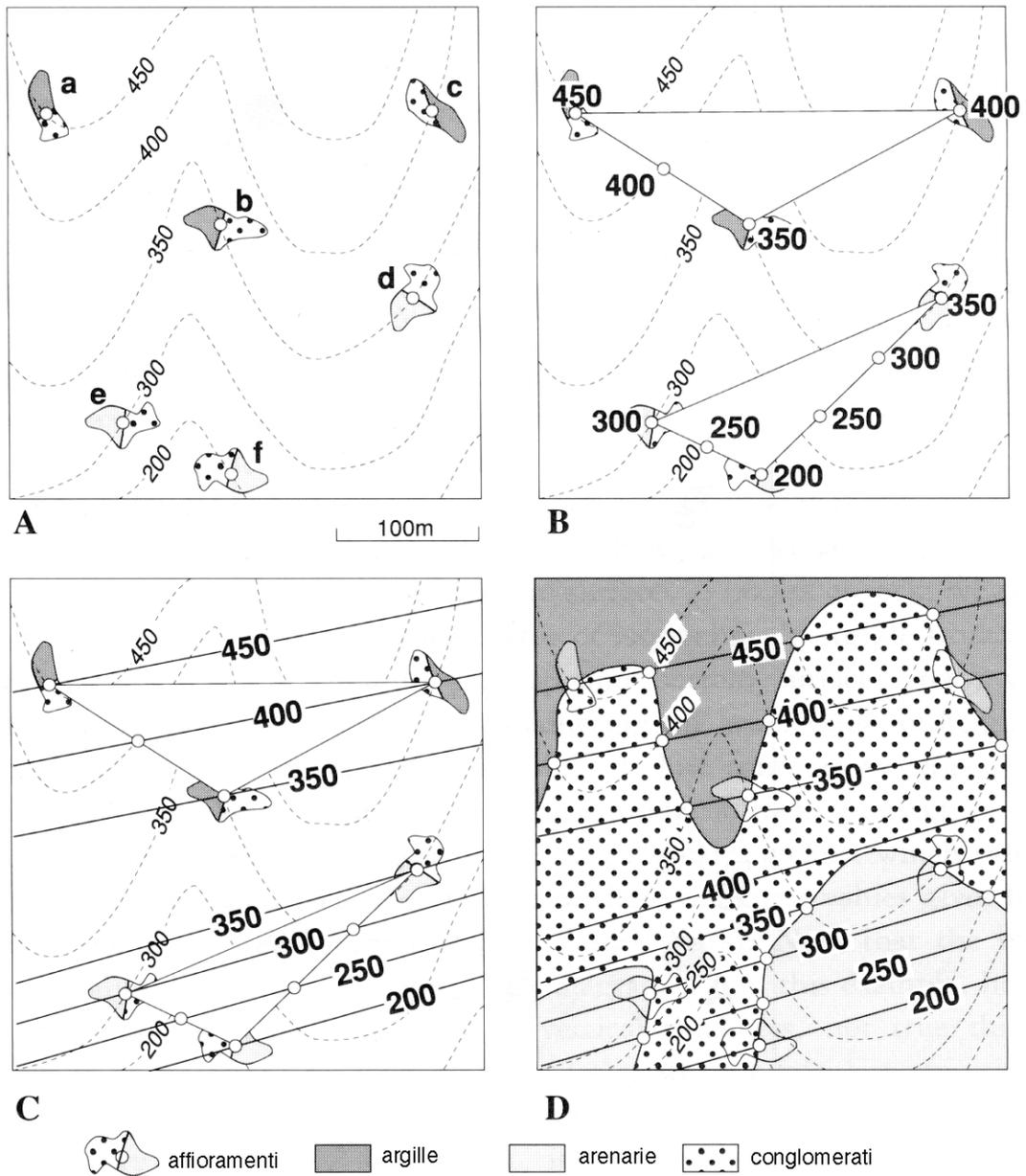


Figura B.3 Costruzione di una carta geologica da informazioni puntuali lungo alcuni contatti.

Bibliografia

- BENNISON G.M., OLVER P.A. & MOSELEY K.A. (2013) - *An Introduction to Geological Structures and Maps*. Routledge, London.
- BOLTON T. (1989) - *Geological Maps. Their Solution and Interpretation*. Cambridge School Press, Cambridge.
- BORRADAILE G. (2014) - *Understanding Geology Through Maps*. Elsevier, Amsterdam, 183 pp.
- BOULTER C.A. (1989) - *Four Dimensional Analysis of Geological Maps. Techniques of Interpretation*. John Wiley & Sons, New York.
- BUSK H.G. (1929) - *Earth Flexures*. Cambridge University Press, Cambridge, 106 pp.
- BUTLER B.C.M. & BELL J.D. (1988) - *Lettura ed Interpretazione delle Carte Geologiche*. Zanichelli, Bologna.
- COATES J. (1945) - *The construction of geological sections*. Quarterly Journal Geological Mining Metallurgical Society of India, 1 (7), 1–11.
- CREMONINI G. (1994) - *Rilevamento Geologico*. Pitagora Editrice, Bologna.
- DALLAGIOVANNA G., SENO S. & VANOSI M. (2001) - *Determining the net slip vector on a fault*. Atti Ticinensi di Scienze della Terra, 42, 59–61.
- DAMIANI A.V. (1994) - *Geologia sul Terreno e Rilevamento Geologico*. Editoriale Grasso, Bologna.
- FOUCAULT A. & RAOULT J. (1982) - *Coupes et Cartes Géologiques*. Doin Editeurs, Paris.
- FUNEDDA A., CARMIGNANI L., PATTA E., URAS V. & CONTI P. (2006) - *Note Illustrative della Carta Geologica d'Italia 1:50.000 "Foglio 556 - Assemini"*. Servizio Geologico d'Italia, Roma, 188 pp.
- GILL W. (1953) - *Construction of geological sections of folds with steep-limb attenuation*. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 37, 2389–2406.
- GROSHONG R.H. (2006) - *3-D Structural Geology. A Practical Guide to Quantitative Surface and Subsurface Map Interpretation*. Springer, Berlin, 400 pp.
- HATCHER R.D. & HOOPER R.J. (1990) - *Laboratory Manual for Structural Geology*. Macmillan, New York, 217 pp.
- LISLE R.J. (1988) - *Geological Structures and Maps*. Pergamon Press, Oxford.
- LISLE R.J. & LEYSHON P.R. (2004) - *Stereographic Projection Techniques for Geologists and Civil Engineers*. Cambridge School Press, Cambridge, 112 pp.
- MALTMAN A. (1998) - *Geological Maps, an Introduction*. John Wiley, Chichester, 184 pp.
- PALMER H.S. (1919) - *New graphic methods for determining the depth and thickness of strata and the projection of dip*. U.S. Geological Survey Professional Paper, 120-G, 123–128.
- PLATT J.I. & CHALLINAR J. (1980) - *Simple Geological Structures*. Thomas Murby & Co., London, 56 pp.
- POWELL D. (1992) - *Interpretation of Geological Structures Through Maps*. Longman, Harlow, England, 176 pp.
- RAGAN D. (2009) - *Structural Geology: An Introduction to Geometric Techniques*. Cambridge University Press, New York, 393 pp.
- RAMSAY J.G. & HUBER M.I. (1987) - *The Techniques of Modern Structural Geology. Volume 2, Folds and Fractures*. Academic Press, London, 391 pp.
- ROBERTS J.L. (1984) - *Introduction to Geological Maps and Structures*. Pergamon Press, Oxford, 322 pp.

- ROWLAND S.M., DUEBENDORFER E.M. & SCHIEFELBEIN I.M. (2007) - *Structural Analysis and Synthesis. A Laboratory Course in Structural Geology*. Blackwell Publishing, 322 pp.
- SIMPSON B. (1993) - *Lettura delle Carte Geologiche*. Flaccovio Editore, Palermo.
- SPENCER E.W. (2017) - *Geologic Maps: A Practical Guide to Preparation and Interpretation*. Waveland Press, 221 pp.
- SUPPE J. (1985) - *Principles of Structural Geology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 537 pp.
- VENTURINI C. (2012) - *Realizzare e Leggere Carte e Sezioni Geologiche*. Dario Flaccovio Editore, ISBN 978-88-579-0153-4, 224 pp.