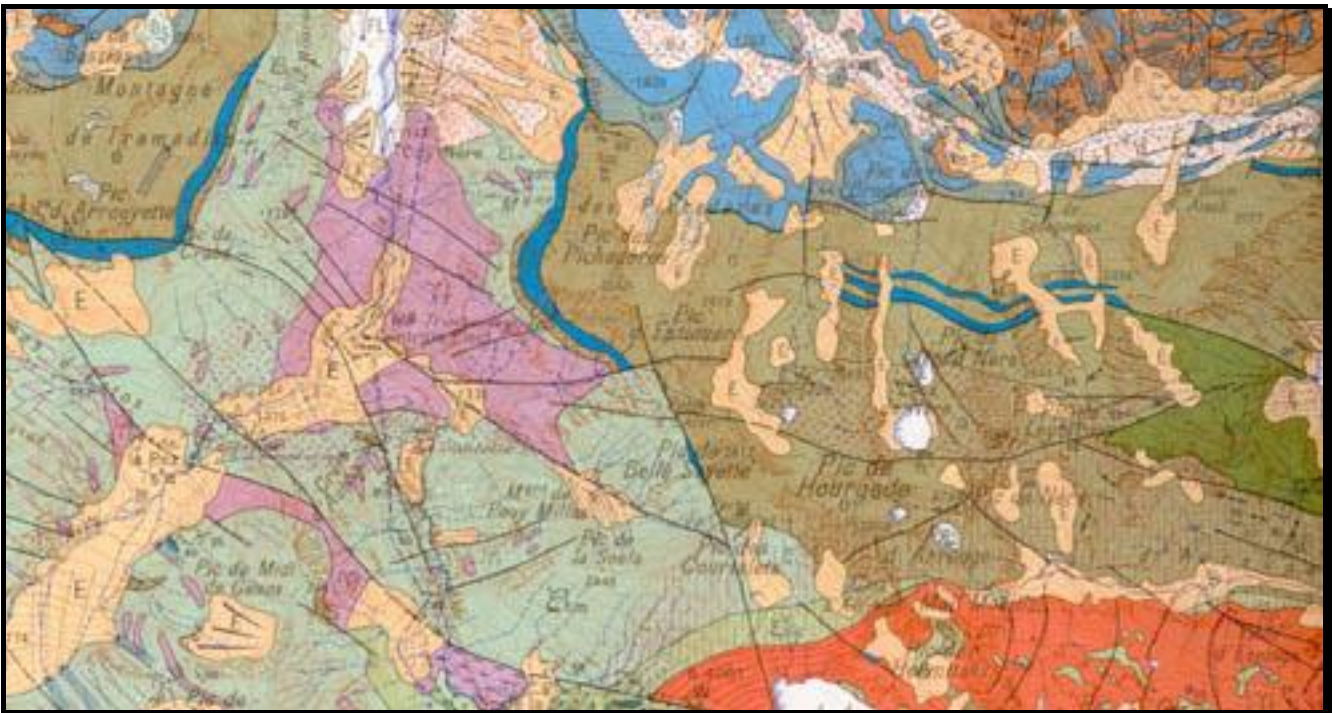


« Métodos de Campo em Geofísica »

Geologia estrutural



Mapeamento Geológico

Prefácio

O mapeamento geológico representa uma ferramenta indispensável para qualquer investigação de pesquisa e constitui a base de aplicações civis e de mineração. Em Geofísica, da prospecção sísmica ao paleomagnetismo, o controle geológico constitui uma base essencial de um projeto científico, tanto como indicador da estrutura do subsolo quanto de uma escala de tempo.

Os mapas geológicos devem representar, sobre uma base topográfica apropriada, a distribuição geográfica das unidades litológicas, sua natureza, idade e estrutura das rochas, bem como as jazidas e recursos minerais. Um mapa geológico é sempre acompanhado de um texto explicativo que detalha todas as formações geológicas presentes no mapa, a hidrologia, a vegetação e os recursos minerais do setor estudado.

Este curso não tem a pretensão de ensinar a elaboração de tal mapa, mas de dar as ferramentas necessárias para poder interpretá-las em termos de grandes estruturas geológicas, e apreender a estrutura superficial da crosta terrestre. Desta maneira, noções elementares sobre a geologia estrutural estão restabelecidas numa primeira parte antes da interpretação do mapa geológico. A determinação das atitudes das camadas geológicas, das espessuras aparente e verdadeira, e a realização dos perfis geológicos serão feitos na forma de exercícios.

Sumário

I) Natureza das formações geológicas

II) Disposição da camadas em relação à tectônica

A. Noção de camada geológica

B. Estruturas de deformação

1. Dobra

2. Falhas

III) Interpretação do mapa geológico

A. Interseção dos limites geológicos com a superfície topográfica

B. Direção do mergulho das camadas

C. Determinação do azimute e mergulho de um plano

D. Determinação da espessura verdadeira e aparente de uma camada

Geologia Estrutural e Mapeamento Geológico

A análise estrutural tem dois objetivos principais :

- definir a natureza das formações em função de dois critérios : idade e litologia
- definir a disposição espacial em relação à tectônica

Esta análise passa pelo estudo detalhado e metódico de um mapa geológico.

I. Natureza das formações geológicas

A superfície da crosta terrestre é constituída de rochas de naturezas diferentes, que podem ter se originado em grandes profundidades ou em superfície. As rochas de origem profunda, como as **rochas ígneas**, constituem assim o embasamento (Fig. 1), enquanto o produto da erosão destas rochas dá origem às **rochas sedimentares** que se depositam na parte mais superficial da crosta terrestre. As rochas ígneas se apresentam na forma de corpos irregulares ou na forma de intrusões (filão) enquanto que as rochas sedimentares se envolvem em camadas organizadas (Fig. 2) nas bacias sedimentares. Posteriormente, estas rochas podem ser afetadas pelo **metamorfismo**. O metamorfismo corresponde à transformação de uma rocha no estado sólido sob a influência de condições físico-químicas diferentes daquelas nas quais se formou a rocha original. Novos cristais são assim formados e novas estruturas cristalina pode se formar. O grau de metamorfismo é função da temperatura (metamorfismo térmico) e da pressão (metamorfismo dinâmico).

Assim o mapa geológico distingue três tipos de rochas que afloram na superfície: rochas eruptivas, metamórficas e rochas sedimentares. Cada um desses tipos é definido pela **idade** e pela **fácies**. A idade da formação é determinada pela datação dos fósseis por exemplo para as rochas sedimentares, ou pela radiocronologia (cf. geocronologia). No mapa geológico, as formações são representadas pelas cores, em função da idade e da estratigrafia. A estratigrafia é o estudo das sucessões das camadas geológicas e é baseada na escala dos tempos geológicos (Tabela 1).

A **fácies** corresponde à categoria à qual a rocha ou a formação pode ser classificada, e pode ser determinada por um ou vários critérios litológicos (litofácies) ou paleontológicos (biofácies). Exemplo: fácies argiloso, fácies calcário com amonitas... O termo fácies é igualmente usado para designar uma categoria correspondente a um meio de sedimentação ex.: fácies recifal, fácies profundo... A litologia das formações é representada na forma de legenda que associa a cada tipo de rocha um símbolo particular como ilustrado na figura 3.

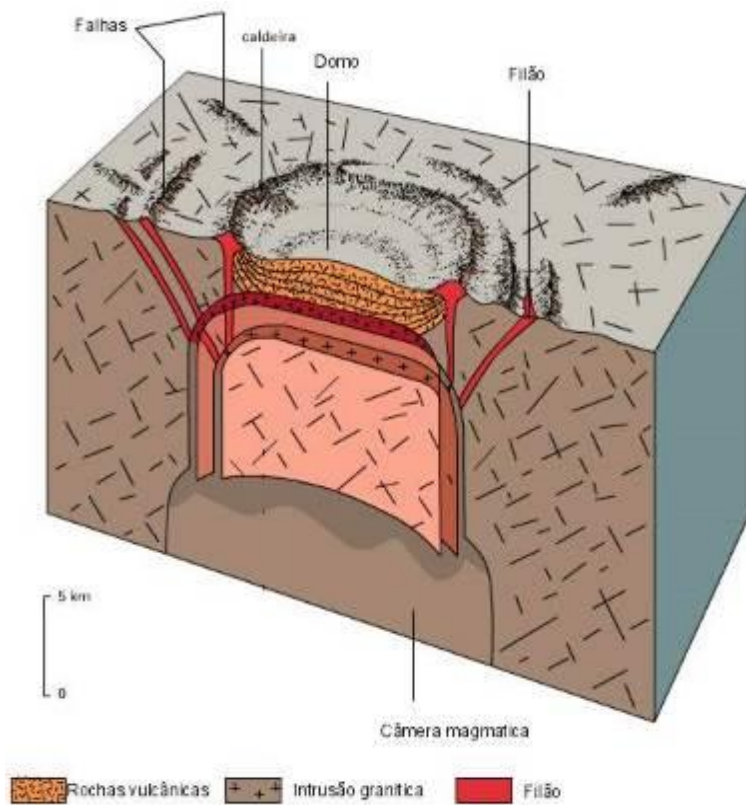


Fig. 1. Câmara magmática

Era	Período	Milhões de anos
Quaternário	Pleistoceno	2
Terciário (Cenozóico)	Plioceno	5
	Mioceno	23
	Oligoceno	34
	Eoceno	55
	Paleoceno	65
Secundário (Mesozóico)	Cretáceo	145
	Jurássico	208
	Triássico	245
Primário (Paleozóico)	Permiano	290
	Carbonífero	360
	Devoniano	400
	Siluriano	440
	Ordoviciano	510
	Cambriano	544
	Pré-cambriano	

Tabela 1. Escala dos tempos geológicos

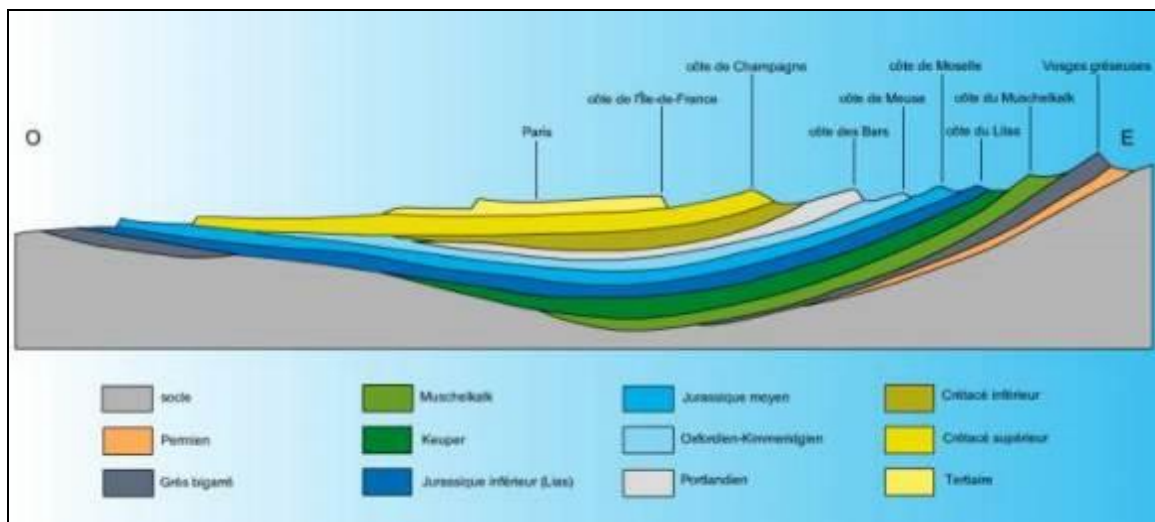


Fig. 2. Camadas sedimentares da bacia de Paris, França

No mapa geológico, as fácies são principalmente detalhadas no **texto explicativo**, geralmente acompanhando o mapa. Na legenda, as fácies são estruturadas em função das principais categorias de rochas: ígneas, vulcânica ou metamórfica, sedimentares e formações recentes (aluviões) do Quaternário. A organização da legenda respeita a sucessão cronológica das fácies: da base até o topo da legenda, vai-se das formações mais antigas para as mais recentes (cf. próximo capítulo).



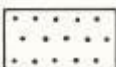






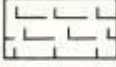
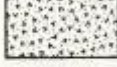


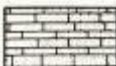
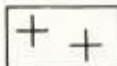
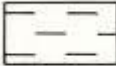


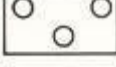


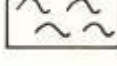
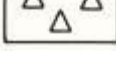
SEDIMENTARY ROCKS		SUPERFICIAL DEPOSITS	
	Sandstone		Alluvium
			Terraces
	Shale		Boulder clay
		IGNEOUS ROCKS	
	Sandy Shale		Volcanics (Basalt, andesite, etc.)
	Limestone		Ashy Sediments
			Dolerite, porphyry, etc.
	Sandy Limestone		Granite
	Clay or Mudstone	METAMORPHIC ROCKS	
	Marl		Quartzite
	Conglomerate		Slate
	Coal		Schist, Gneiss, etc.
	Breccia		

Fig. 3. Exemplo de legenda litológica

II. Disposição das camadas em relação à tectônica

A. Noção de camada geológica

As rochas sedimentares se depositam em planos relativamente paralelos e organizados em camadas geológicas. Uma **camada geológica** ou **estrato**, é uma unidade de rochas sedimentares incluídas entre duas superfícies aproximadamente paralelas que correspondem a uma descontinuidade entre as características petrográficas das camadas jacentes (**planos de estratificação**, Fig.4). Uma **formação geológica** pode ser considerada como um certo volume de rochas identificadas por um critério particular como a litologia (calcário, argilas...). Ela inclui as camadas geológicas.

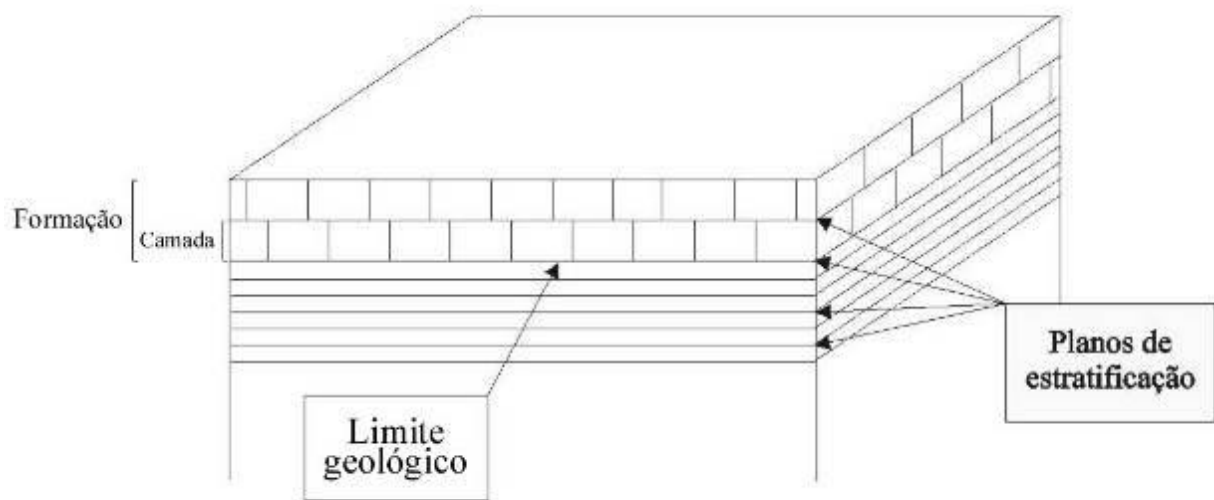


Fig. 4. Camadas geológicas horizontais e concordantes

Quando uma formação sedimentar recosta normalmente sobre camadas mais antigas que não foram dobradas ou inclinadas anteriormente pelos esforços tectônicos (contato paralelo aos planos de estratificação, Fig. 4) e mesmo se existe um hiato entre os dois grupos (concordância estratigráfica), as camadas são chamadas de **concordantes**.

No caso contrário, os limites das camadas apresentam um certa inconformidade que poder ser ligada a vários mecanismos : à atividade tectônica (**discordância angular**), hiato de erosão ou de não deposição (**discordância erosiva**), à intrusão de corpos magmáticos ou contato do sedimento com o embasamento cristalino (**limite de não conformidade**).

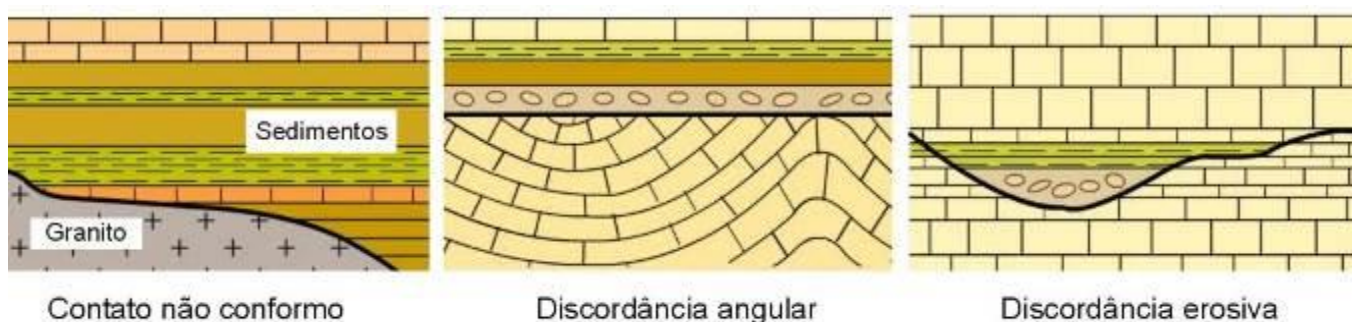


Fig. 5. Tipos de discordância

Em estratigrafia, as camadas são “**normais**” quando as mais jovem sobrepõem as camadas mais antigas (cf. principio de superposição estratigráfica) e são “**inversas**” no caso contrário. Em estrutural as camadas podem ser **tabulares** (horizontais), **monoclinais** (inclinadas) ou **dobradas**. Por exemplo, a foto da figura 6 ilustra camadas geológicas inclinadas, caracterizando uma forma estrutural monoclinal particular chamada “cuesta”.

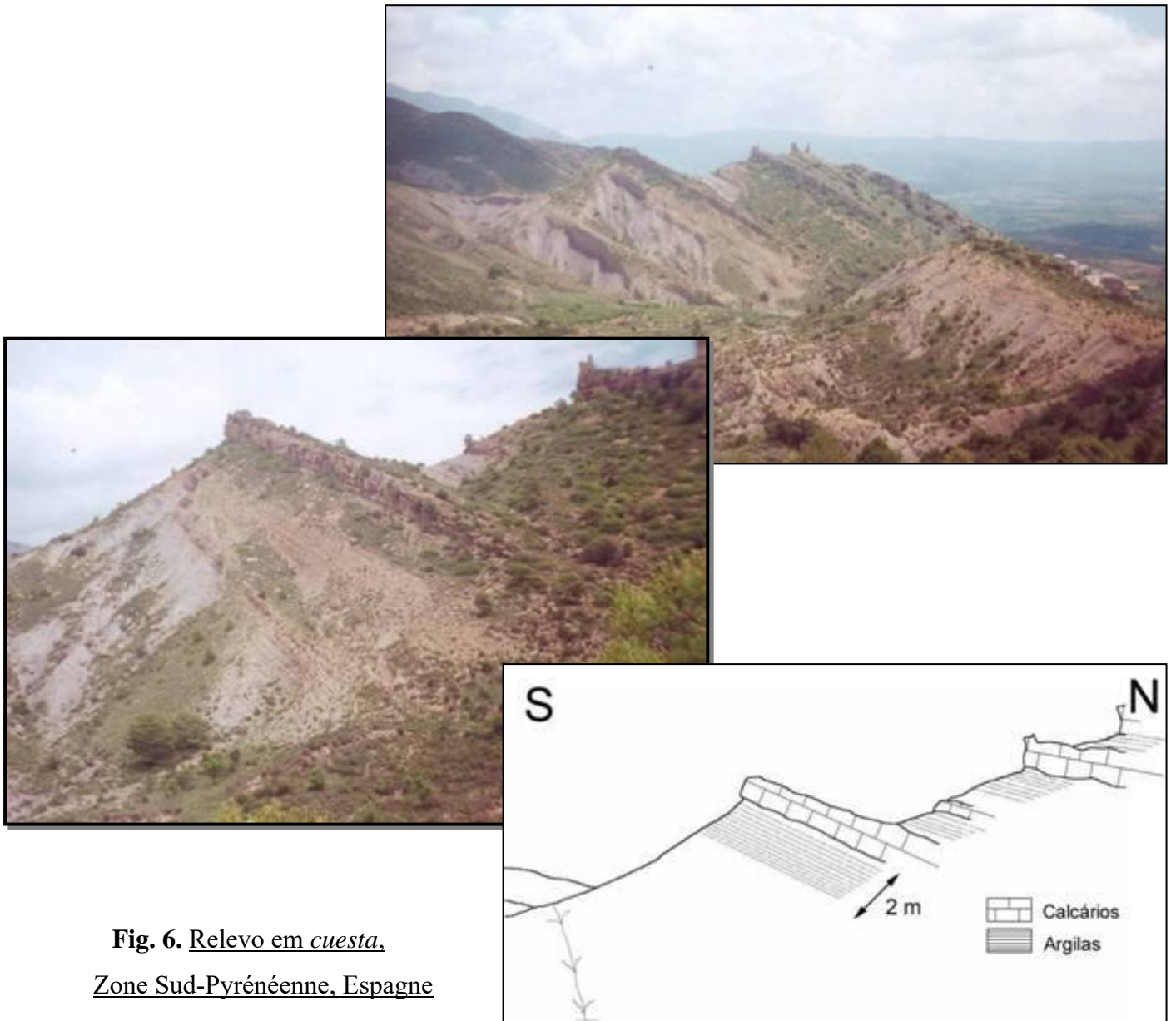
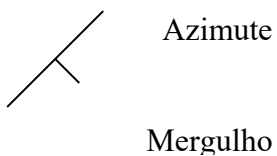


Fig. 6. Relevo em *cuesta*,
Zone Sud-Pyrénéenne, Espagne

A organização em três dimensões de tais camadas pode ser definida pela atitude dos planos de estratificação (Fig. 7). A **atitude** de um plano compreende o azimute, ângulo entre o norte geográfico e o plano horizontal, e o mergulho. São representadas das formas seguintes:



Mergulho	Normal	Pouco inclinada	Muito inclinada	Horizontal	Vertical
Símbolo					

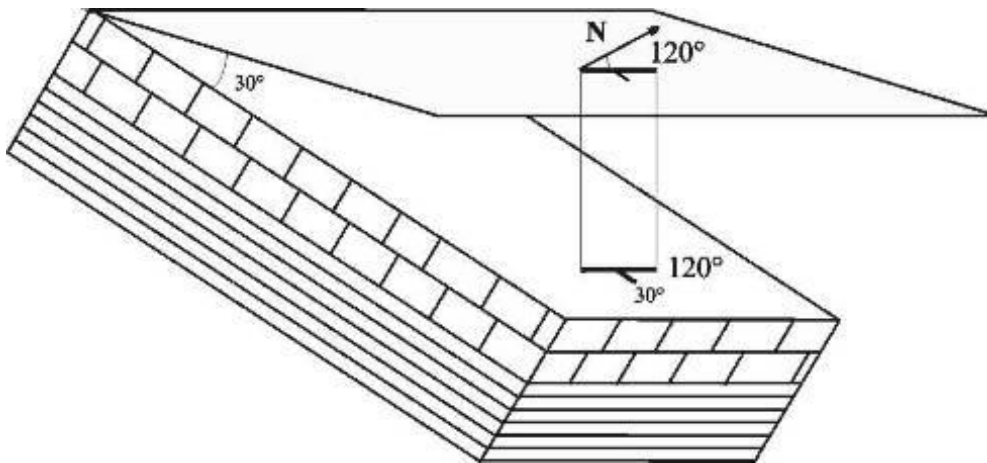


Fig. 7. Projeção em plano do atitude das camadas geológicas

O ângulo de mergulho medido numa direção oblíqua à direção das camadas tem um valor inferior à inclinação real e é chamado de **mergulho aparente** (Fig. 8). Os afloramentos que ocorrem na natureza não são geralmente paralelos à direção do **mergulho verdadeiro** e a inclinação que medimos no campo corresponde ao mergulho aparente.

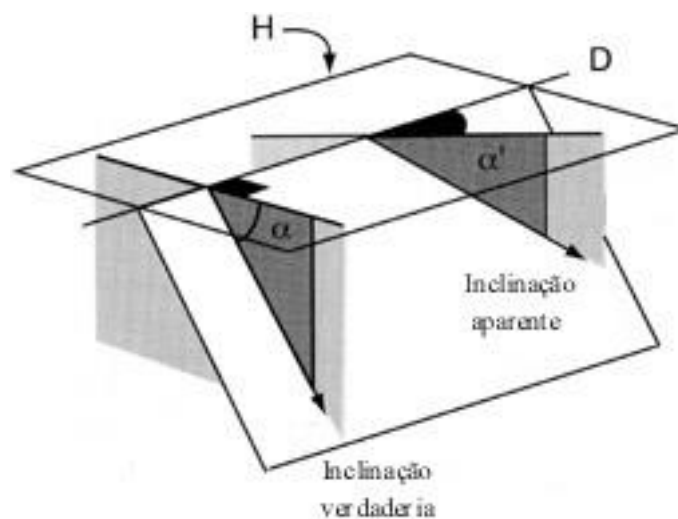


Fig. 8. Mergulho verdadeiro e mergulho aparente

B. Estruturas de deformação

As propriedades reológicas (reologia = estuda da deformação dos corpos reais) de uma certa rocha são, fisicamente, intermediárias entre os comportamentos ditos elástico, viscoso e plástico. Quando uma rocha é submetida a uma deformação crescente orientada, ela se comporta primeiro de maneira elástica, depois, rapidamente, de maneira rígida – plástica (dúctil) até um valor suficiente da deformação para poder provocar a ruptura. Os domínios de elasticidade, de ductilidade, e os limiares de ruptura variam em função do material (ex: um calcário é mas dúctil que um dolomito), da

temperatura e da pressão (*cf.* diagrama de Mohr). As estruturas dobradas caracterizam a deformação dúctil enquanto as falhas, diaclases e falhas transcorrentes se desenvolvem na deformação de ruptura.

1) Dobras

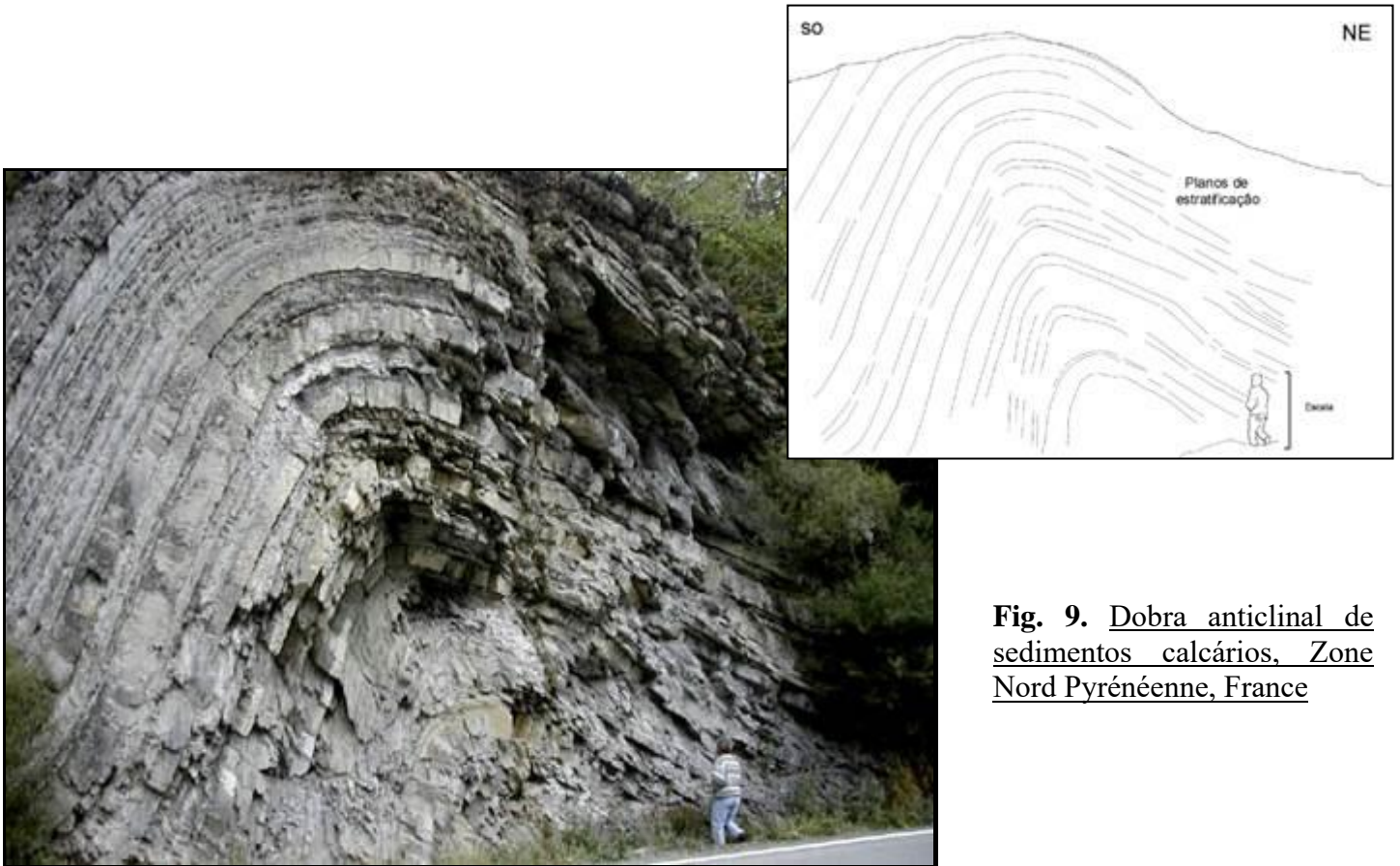


Fig. 9. Dobra anticlinal de sedimentos calcários, Zone Nord Pyrénéenne, France

Uma dobra é formada pela deformação resultante da flexão ou da torção das rochas. Por definição, uma dobra que desenha uma curva convexa para cima é chamada de estrutura antiformal; se a curva é côncava para cima, a dobra é chamada de sinformal (Fig. 10). Estes termos são unicamente descritivos. Na geologia estrutural, os termos de anticlinal e sinclinal são mais usados em relação à cronologia relativa das camadas. Assim, é chamado anticlinal, uma antiformal na qual os elementos situados no interior da estrutura são os mais antigos; uma estrutura sinclinal corresponde a uma sinformal onde os elementos situados no interior são mais recentes.

Uma dobra é caracterizada pela charneira, região de curvatura máxima, e os flancos que são as partes situadas entre duas charneiras. O eixo da dobra é a linha que passa por todas as charneiras de uma mesma superfície (Fig. 11) enquanto que o plano axial passa por todos eixos. Em função da inclinação do plano axial, a dobra pode ser qualificada de dobra normal, inclinada ou deitada.

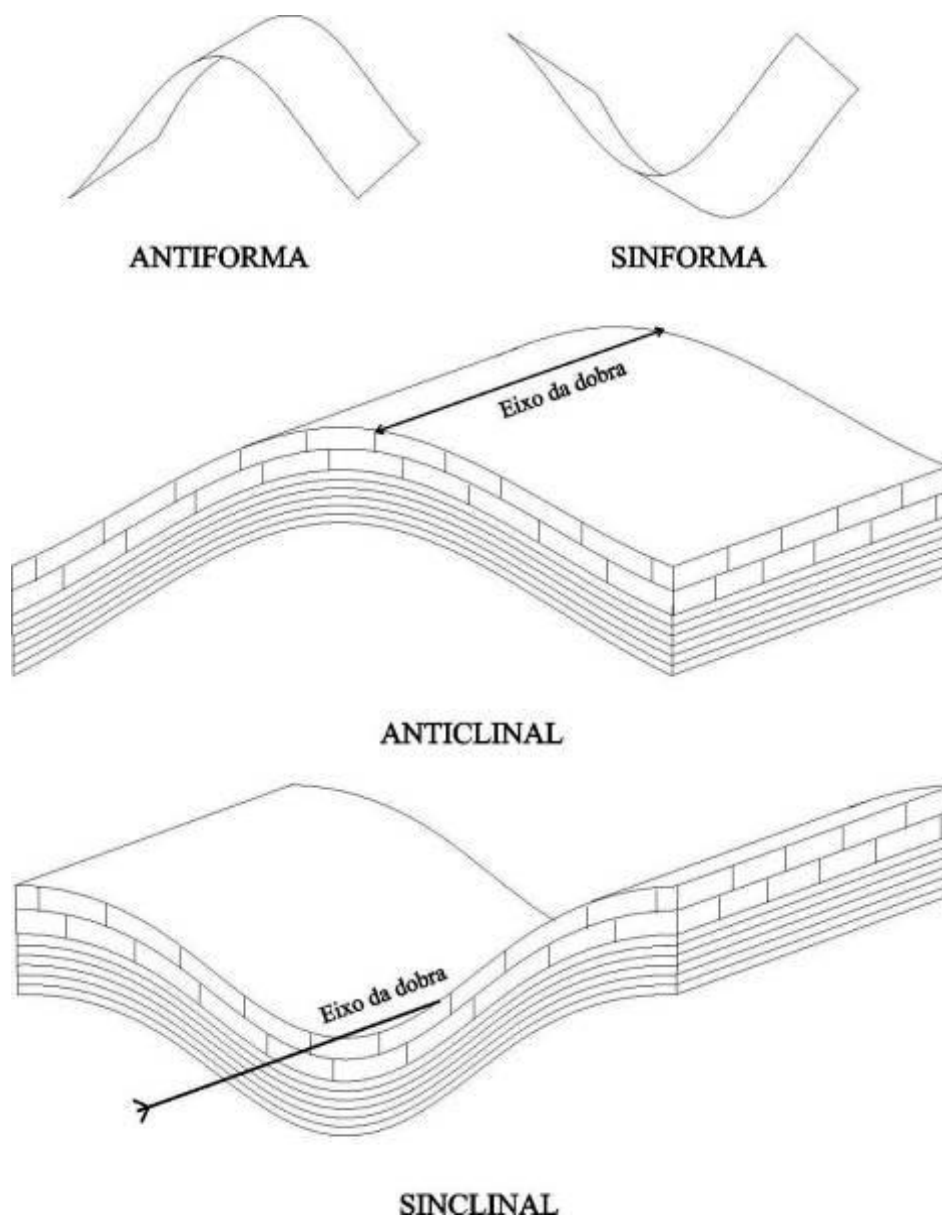


Fig. 10. Nomenclatura das dobras

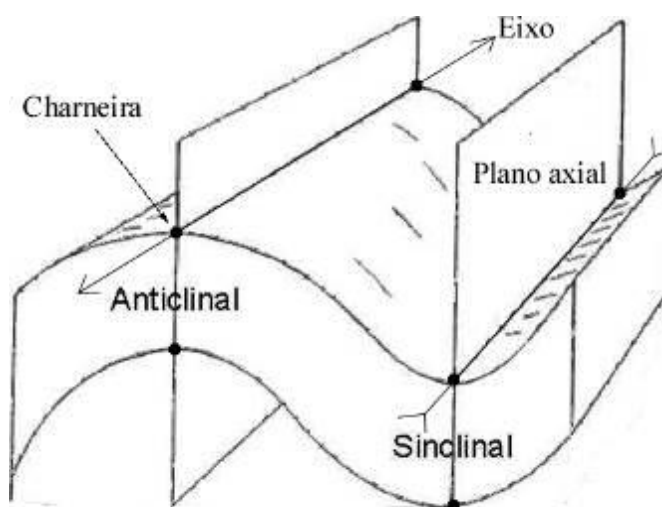


Fig. 11. Charneira, Eixo e Plano axial de dobra

2) Falhas

Quando a deformação é suficientemente importante, ela poder provocar a ruptura das rochas. Por definição, uma fratura sem movimento é chamada de diaclase enquanto que o termo de falha é usado para as estruturas de ruptura com deslocamento relativo das duas partes afetadas. Existem vários tipos de falhas em função do movimento relativo : **falha normal** (estrutura extensiva), **falha inversa** (estrutura compressiva) e **falha transcorrente** (falha vertical com movimento unicamente horizontal) (Fig. 12).

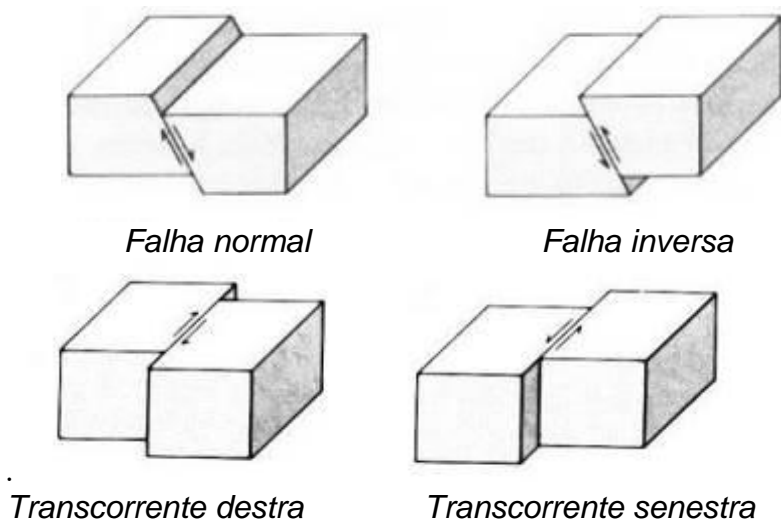


Fig. 12. Nomenclatura das falhas

O **plano de falha** é definido pela atitude e rejeito (Fig. 13). O rejeito horizontal R_h , corresponde à distância do deslocamento no plano horizontal; o rejeito vertical R_v , representa a distância do deslocamento no plano vertical. No campo, o plano de falha é reconhecido pelo preenchimento de minerais recristalizados, pela intermediária de fluidos de percolação (águas meteóricas enriquecidas em cálcio e silício) e de minerais neoformados (epidoto). O movimento pode igualmente ser determinado pela orientação das **estrias** geradas ao longo dos planos preenchidos.

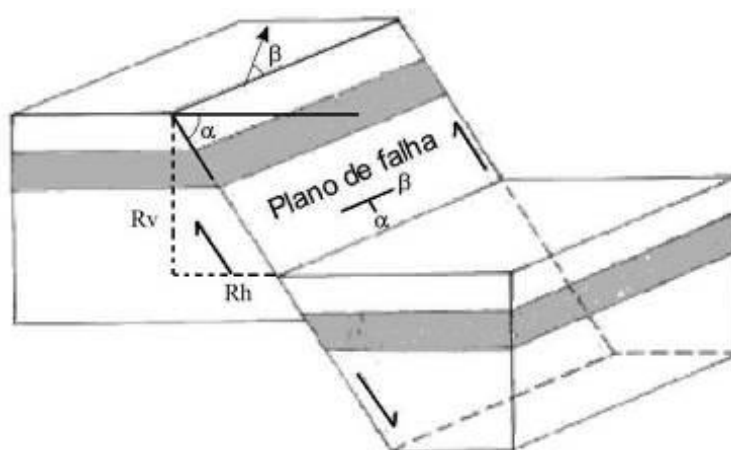


Fig. 13. Plano de falha normal

III. Interpretação do mapa geológico

Em geologia, as rochas e estruturas terrestres se exprimem em três dimensões e a distribuição das rochas na superfície da Terra é simplesmente função da maneira que esta disposição tridimensional corta a superfície topográfica. O mapa geológico é um mapa topográfico no qual foram traçados os **contornos geológicos** (a interseção dos limites geológicos com a superfície topográfica) (Fig. 14) :

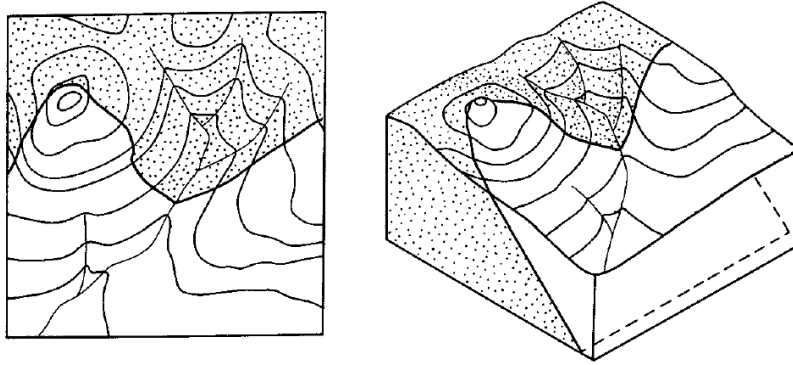


Fig. 14. Mapa geológico e bloco diagrama

Os mapas geológicos devem conter informações que possibilitem representar a morfologia da superfície terrestre. Com um pouco de prática, uma pessoa pode ler neste mapa a disposição das camadas e deduzir a organização em profundidade, até mesmo reconstituir esta organização antes da erosão.

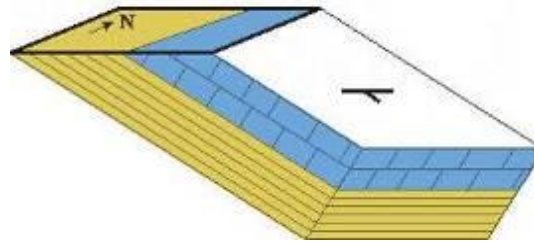
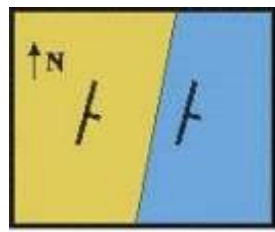
A. Interseção dos limites geológicos com a superfície topográfica

Para poder apreender a visualização das camadas em três dimensões a partir das informações dos mapas geológicos, algumas projeções em plano horizontal de estruturas geológicas típicas são ilustradas na Figura 15. Esta figura ilustra o que nós poderíamos observar num mapa se o corte topográfico fosse horizontal. As informações dadas pela interseção entre o plano horizontal e as estruturas geológicas permitem definir os contornos geológicos das diferentes camadas e, no caso de estruturas dobradas, o eixo da dobra. Neste exemplo, o contorno geológico corresponde ao limite entre as camadas calcárias e as camadas argilosas.

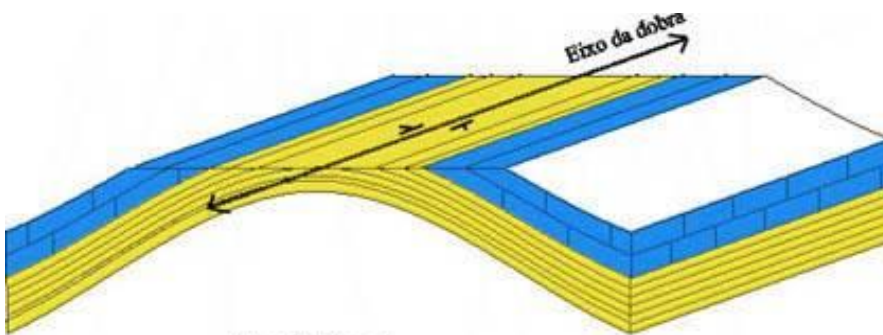
B. Direção do mergulho das camadas

O mapa geológico é uma interpretação em plano, da organização em 3D das estruturas geológicas através de um corte na topografia. As informações que provem as curvas de nível e os contornos geológicos permitem visualizar em três dimensões esta organização. Assim, como mostra a figura 16, na presença de camadas horizontais as curvas de nível são quase paralelas aos contornos geológicos. Se os contornos geológicos cruzam as curvas de níveis, as camadas são inclinadas. No

caso de camadas inclinadas, o sentido geral do mergulho pode ser determinado pela forma dos contornos em relação ao “V” formado pelas curvas de nível no vale. Neste caso, o “V” formado pelos contornos geológicos indicam o sentido do mergulho (Fig. 16).

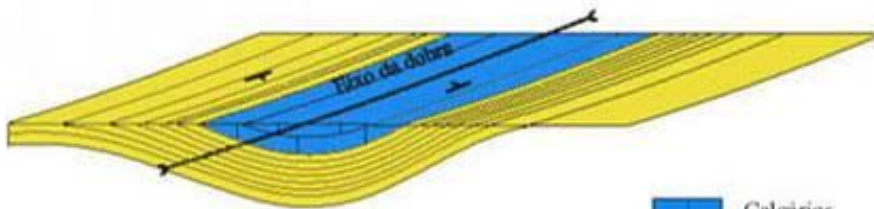


Camadas planas inclinadas



Anticlinal

Camadas dobradas



Sinclinal



Fig. 15. Projeção no plano horizontal das estruturas geológicas em três dimensões

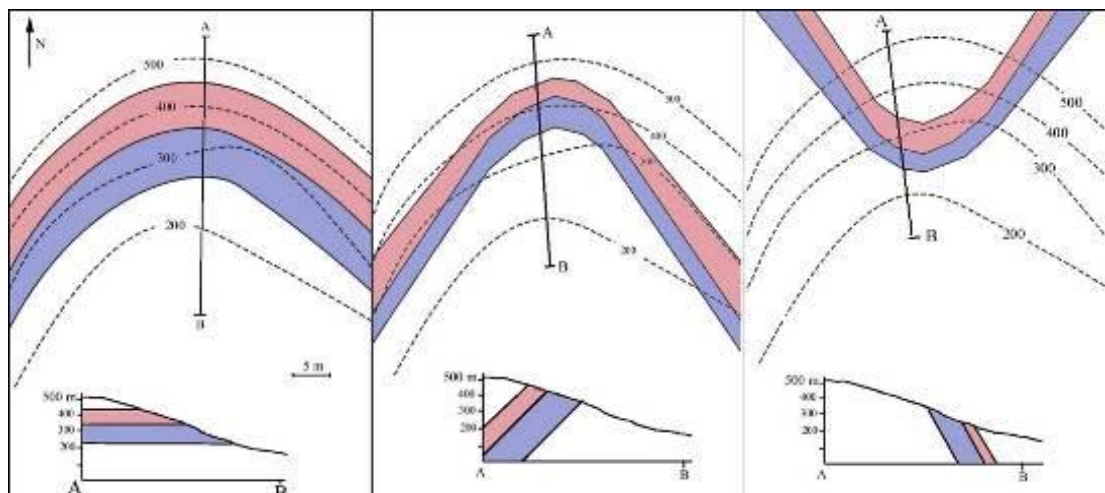


Fig. 16. Direção do mergulho das camadas geológicas

C. Determinação do azimute e mergulho de um plano

A partir das curvas de níveis e os contornos geológicos, algumas técnicas gráficas permitem determinar o azimute e o mergulho das camadas. Na presença de camadas isópacas e concordantes, se um contorno geológico cruza em vários lugares uma única curva de nível, a linha passando pelos pontos de interseção entre estas curvas representa a **linha da horizontal** da camada. O ângulo entre o norte indicado no mapa e esta linha determina o azimute da camada. Assim entre várias camadas de mesma inclinação é possível traçar as diferentes linhas horizontais entre as curvas de nível sucessivas e espaçadas de um valor constante dependente da inclinação (Fig. 17). Estas linhas são chamadas de **contornos estruturais**.

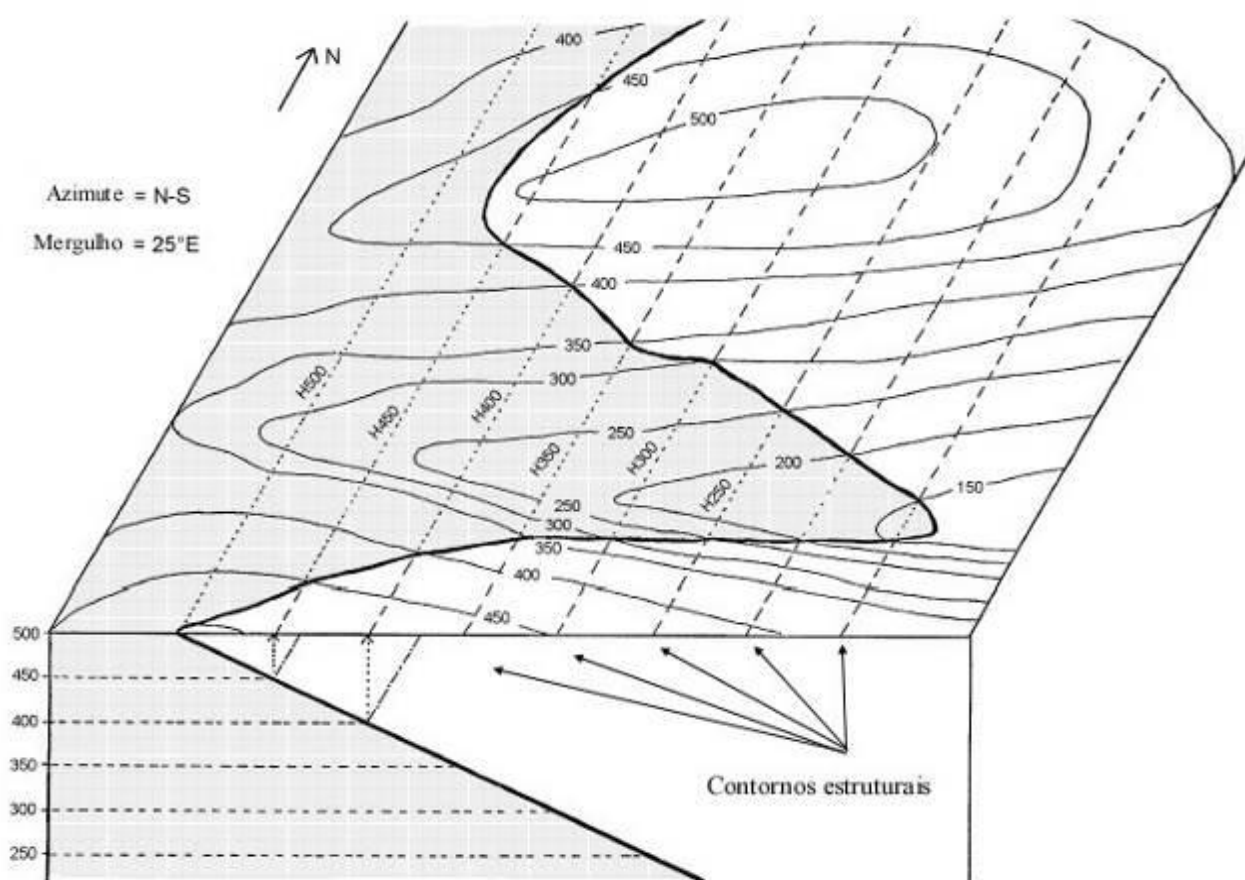


Fig. 17. Contornos estruturais

No exemplo da Figura 18, as camadas têm orientação N-S e como a inclinação é constante ao longo do contacto geológico, os contornos estruturais são equidistantes. Desta propriedade resulta que a distância medida entre duas linhas estruturais permite calcular o valor da inclinação verdadeira.

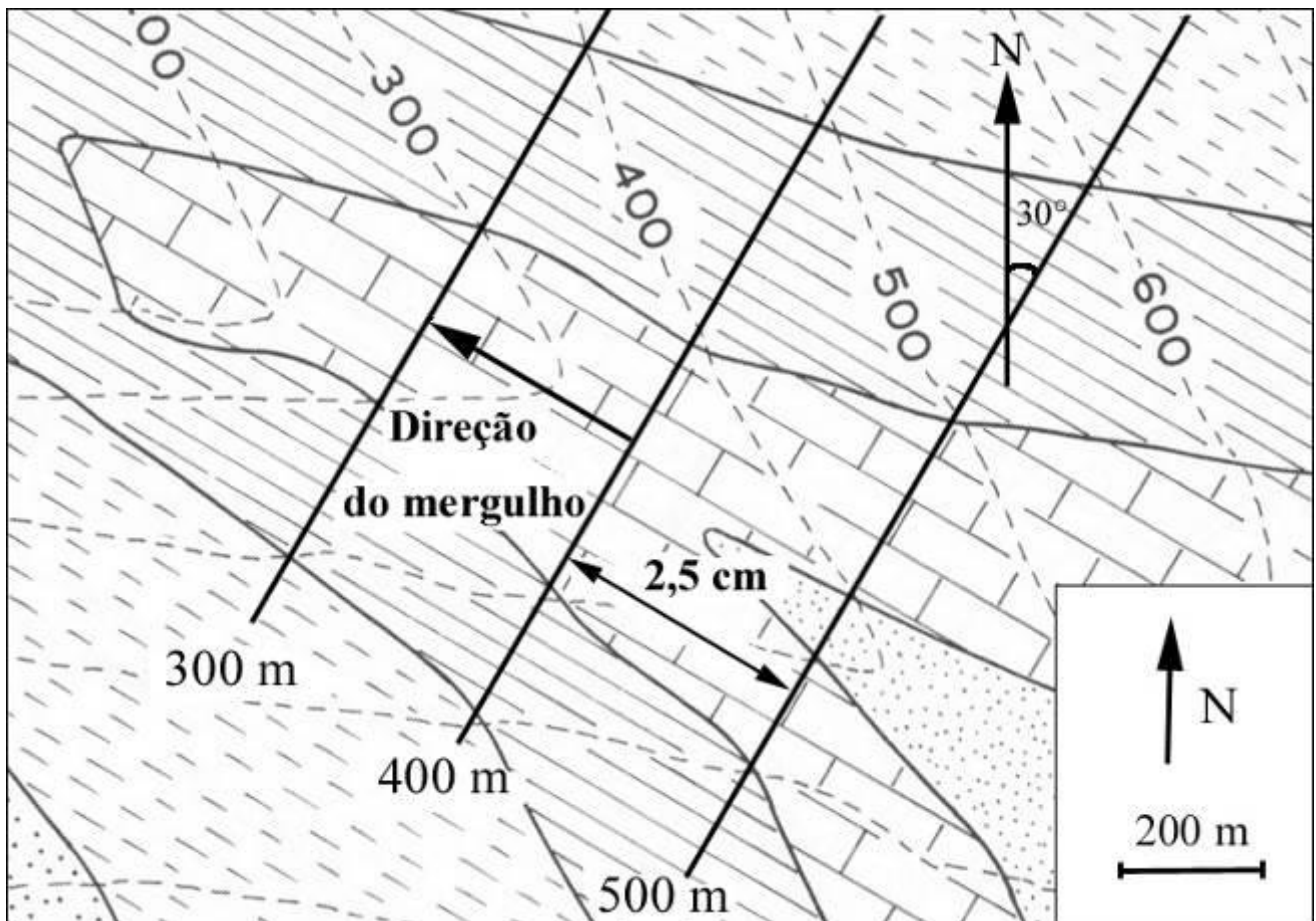
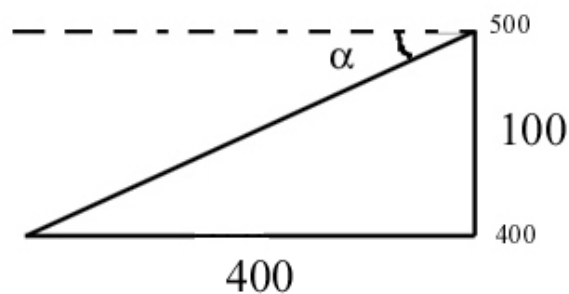


Fig. 18. Contornos estruturais e determinação do mergulho das camadas

O azimute da camada de calcário é de N30° e a direção do mergulho é indicada pelos contornos geológicos (V no vale). Na escala do mapa, 1,25 cm representa 200 metros, então a distância horizontal real entre dois contornos estruturais é de 400 m. O gradiente desta camada é obtido da forma seguinte :



$$\text{Gradiente} = 1/4 = 0,25$$

O valor da inclinação é obtido pela tangente inversa do gradiente :

$$\tan \alpha = 0,25 \quad \Leftrightarrow \quad \alpha = \tan^{-1} 0,25 = 14^\circ$$

D. Determinação da espessura verdadeira e aparente de uma camada geológica

A **espessura verdadeira** de uma camada é a distância mínima entre a base e o topo, medida na perpendicular os limites inferior e superior da camada (Fig. 19). Qualquer outra medida feita com um ângulo diferente de 90° vai dar uma distância maior chamada **espessura aparente**. A espessura verdadeira e a espessura aparente podem ser determinadas com simples métodos trigonométricos a partir dos valores de inclinação (Fig. 20).

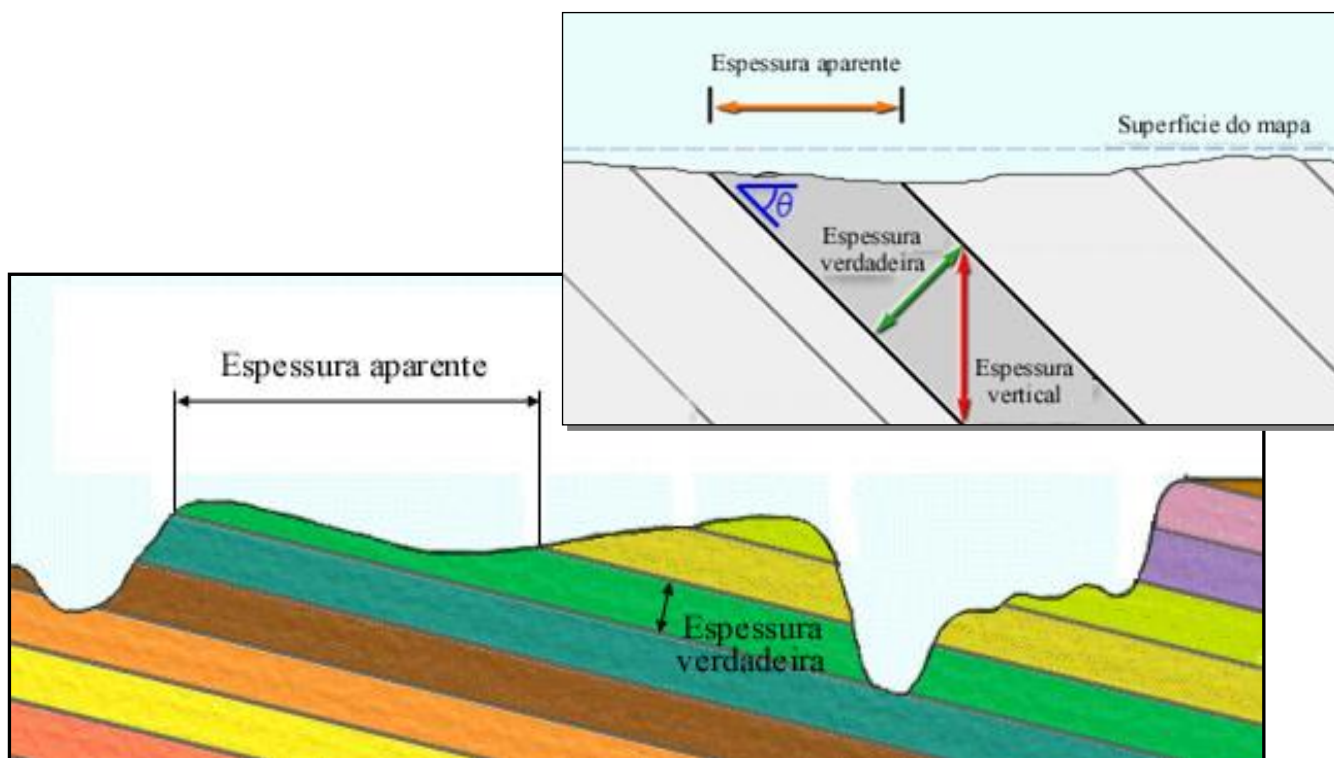


Fig. 19. Espessura aparente e espessura verdadeira

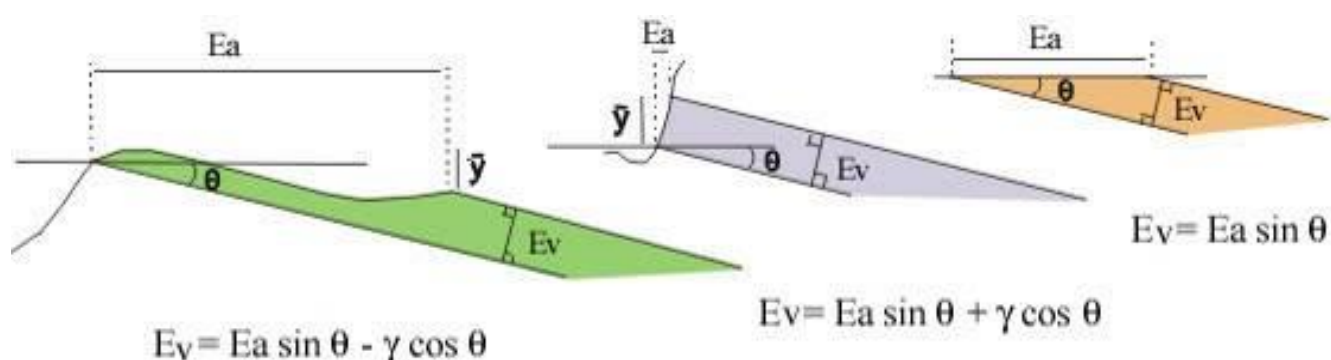
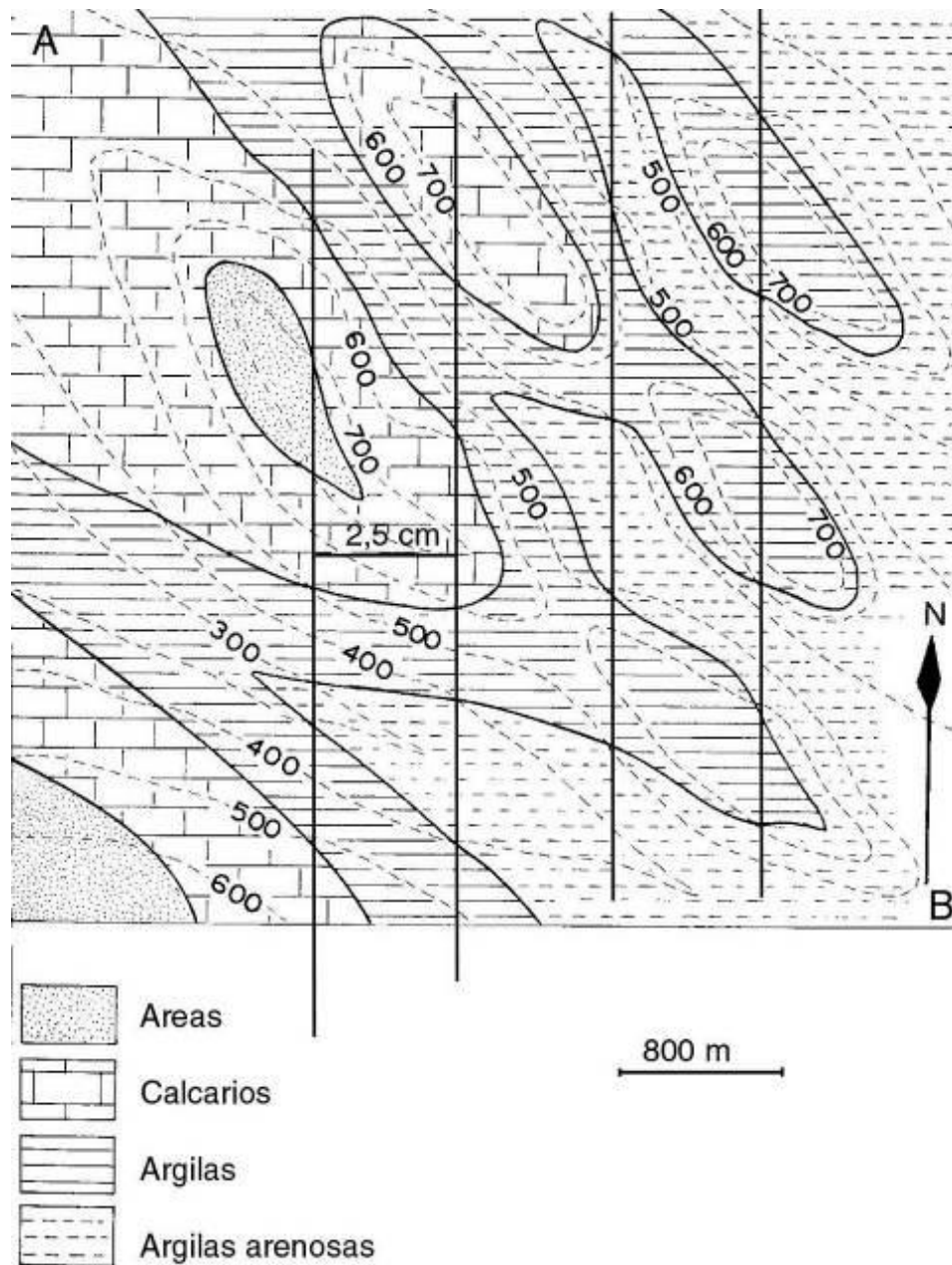


Fig. 20. Diferentes exemplos da determinação das espessuras

A Figura 20 ilustra três casos diferentes onde a inclinação da topografia e a direção de mergulho da camada são coincidentes, a topografia é inversa ao mergulho das camadas, e quando a topografia é horizontal. Nos dois primeiros casos as fórmulas não são tão simples e falta o topo da formação sabendo que a topografia é variável.

IV. Exercícios

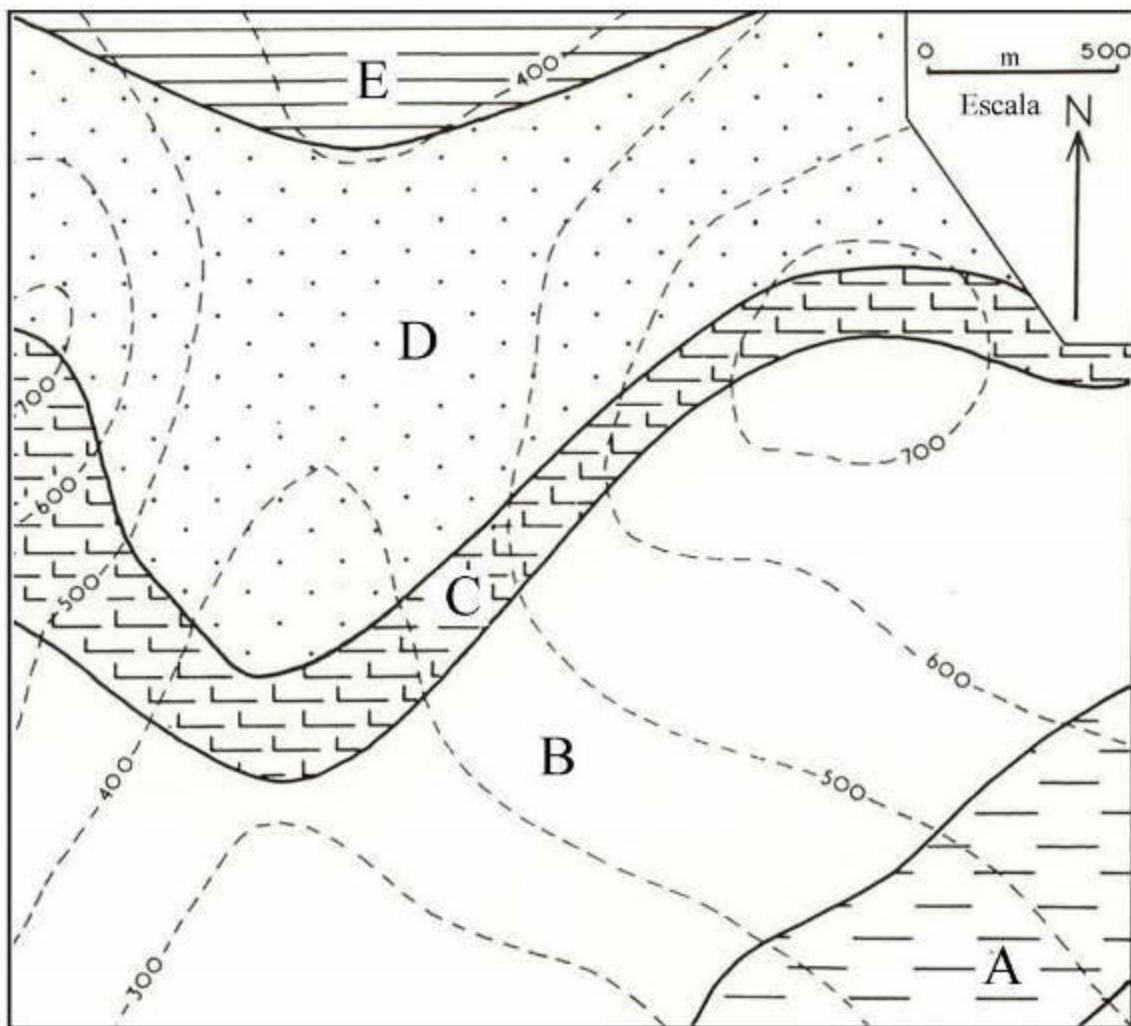


- 1) Determinar o azimute e mergulho das camadas.
- 2) Fazer um perfil geológico de A a B.

Resposta :

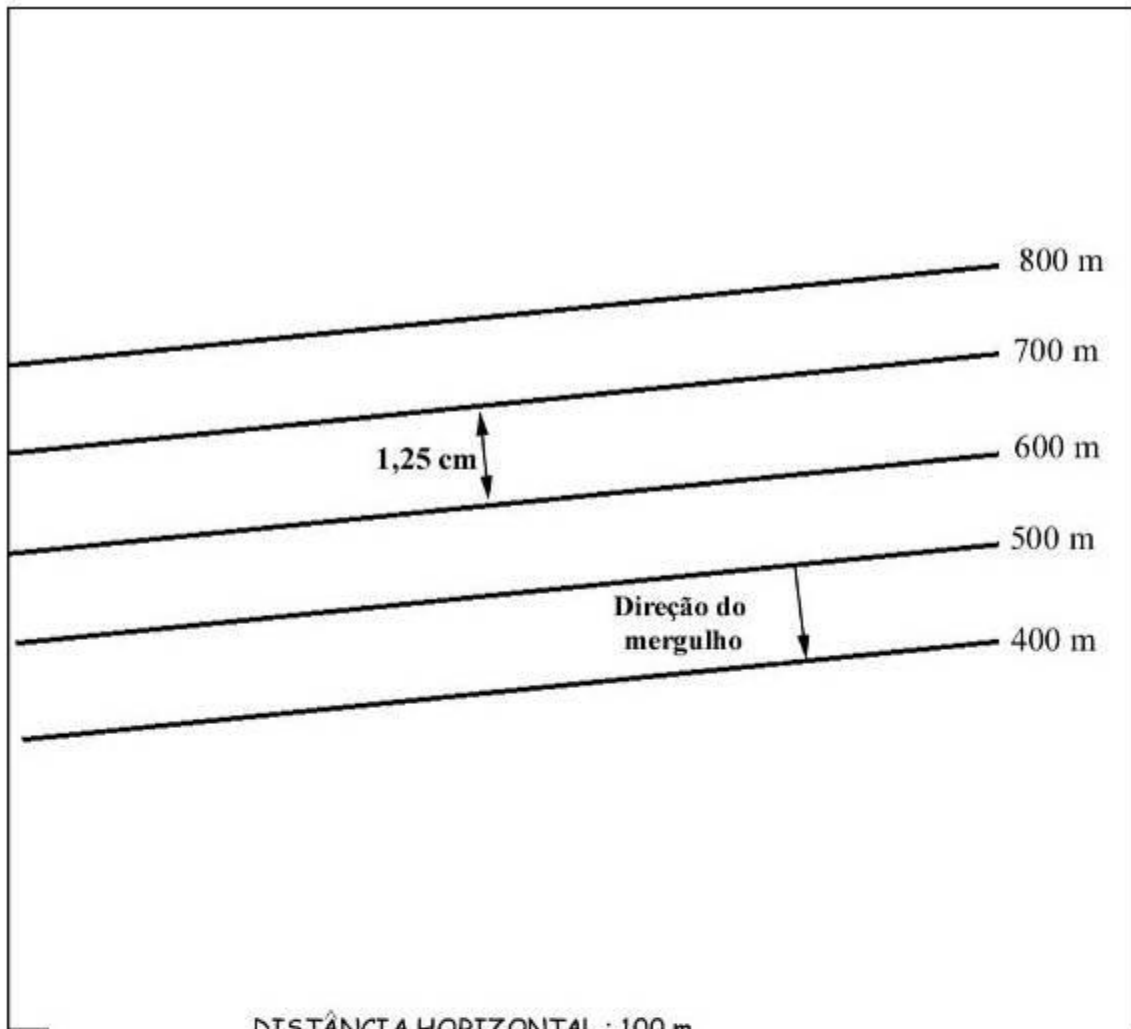
Azimute N-S

$\alpha = 7,1$ graus



- 1º) Podemos deduzir a direção do mergulho das camadas A, B, C, D, E e F sabendo que a camada A é mais jovem que a camada F ?
- 2º) Somente com as curvas de nível e os contornos estruturais, podemos obter a direção da camada C ?
- 3º) Traçar as linhas de direção para todas as camadas. O que você observa ?
- 4º) Calcular o mergulho das camadas.

Exercício II - Camadas inclinadas

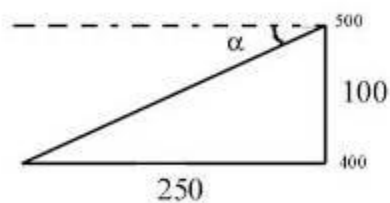


DISTÂNCIA HORIZONTAL : 100 m

DISTÂNCIA VERTICAL :

Na escala : 2,5 cm no mapa representa 500 m na realidade

\Leftrightarrow 1,25 cm representa 250 m na realidade



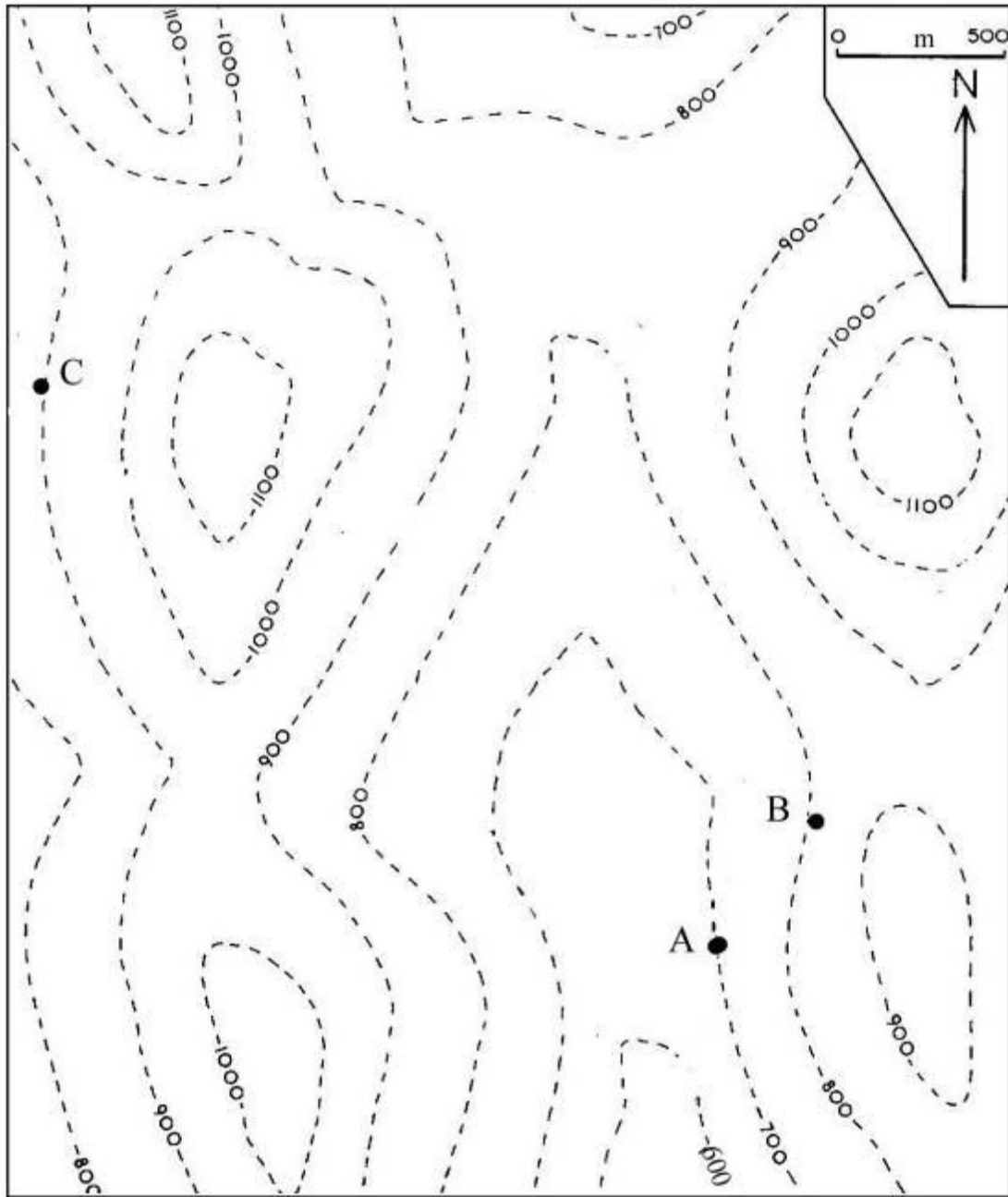
O gradiente da camada é definido :

$$\frac{1}{2,5} = 0,4$$

E a tangente inversa do gradiente permite de obter o ângulo de mergulho da camada α :

$$\tan \alpha = 0,4 \quad \Rightarrow \quad \alpha = \tan^{-1} 0,4 = 22^\circ$$

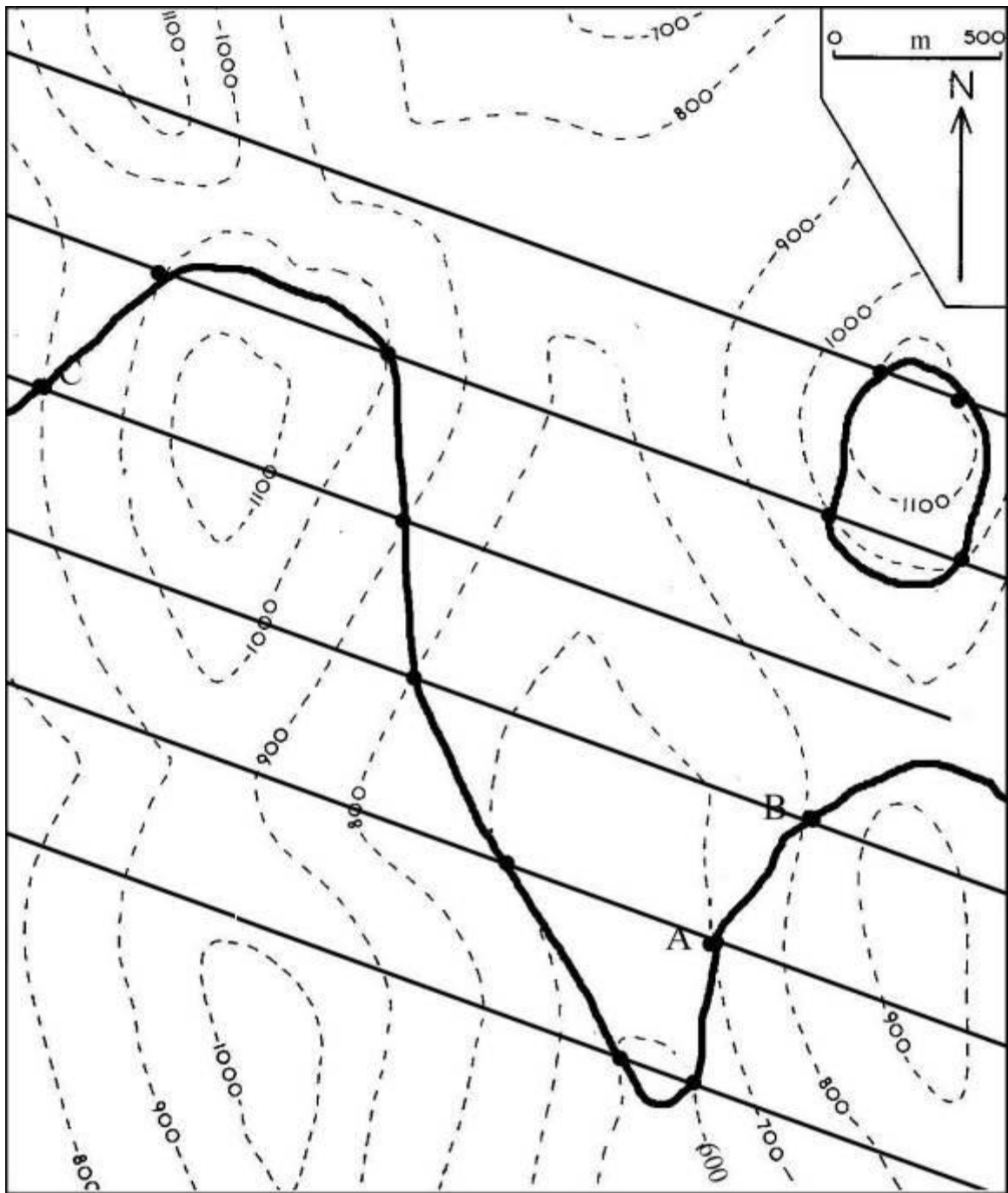
Solução



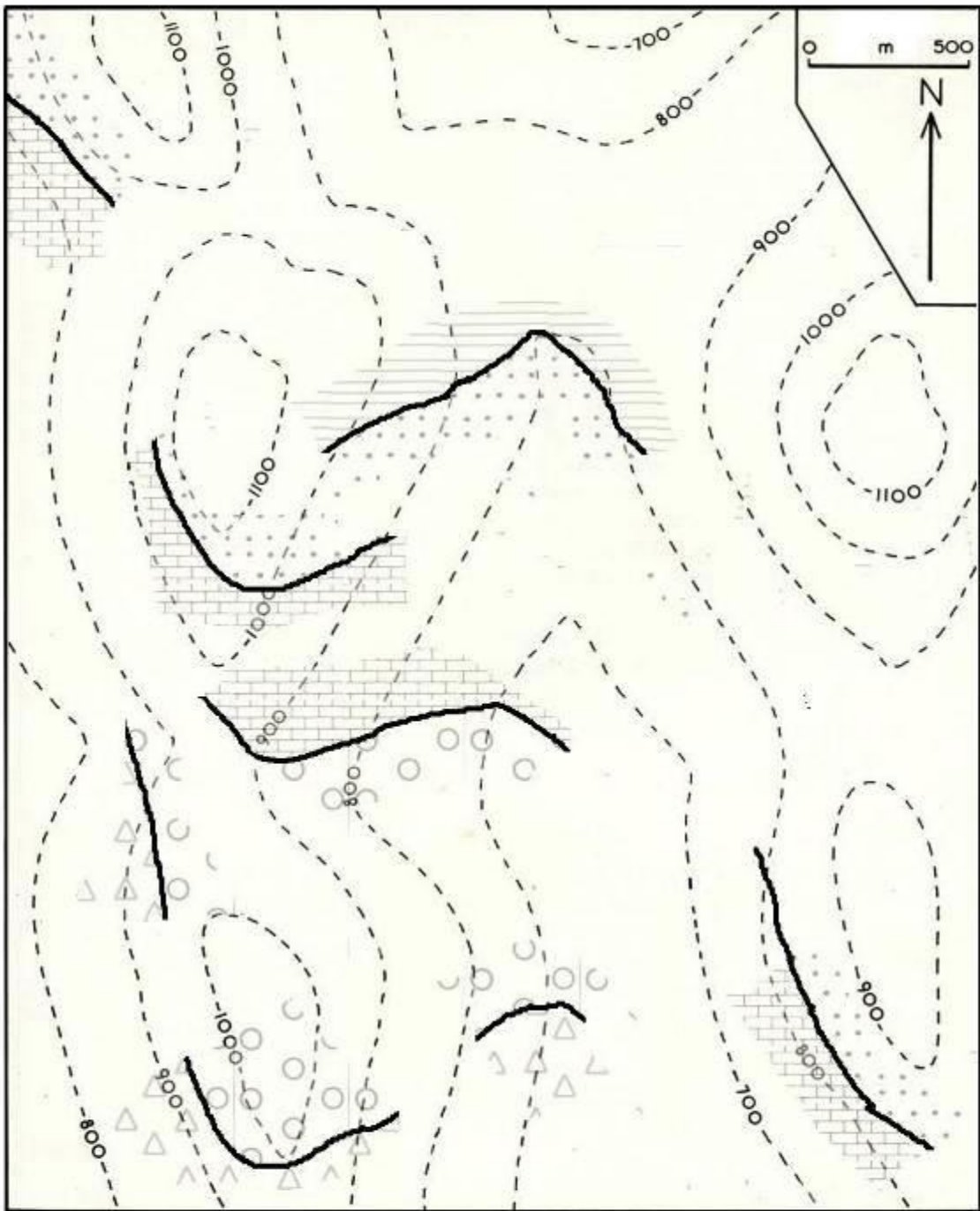
Uma camada de 2 metros de espessura aflora em três pontos A,B e C.

- Traçar o contorno geológico desta camada no mapa topográfico
- Determinar o azimute e o mergulho da camada

Exercícios III

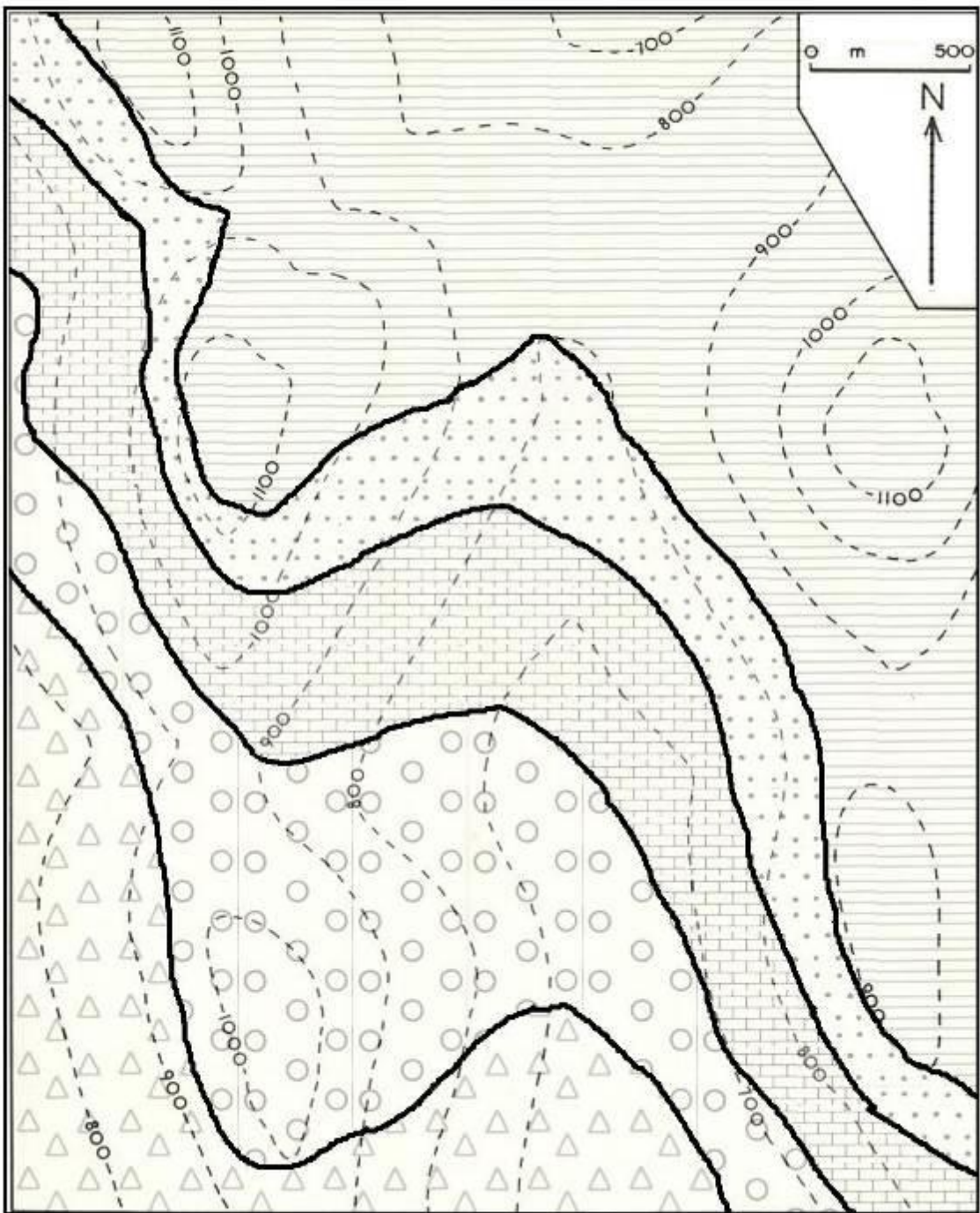


Solução

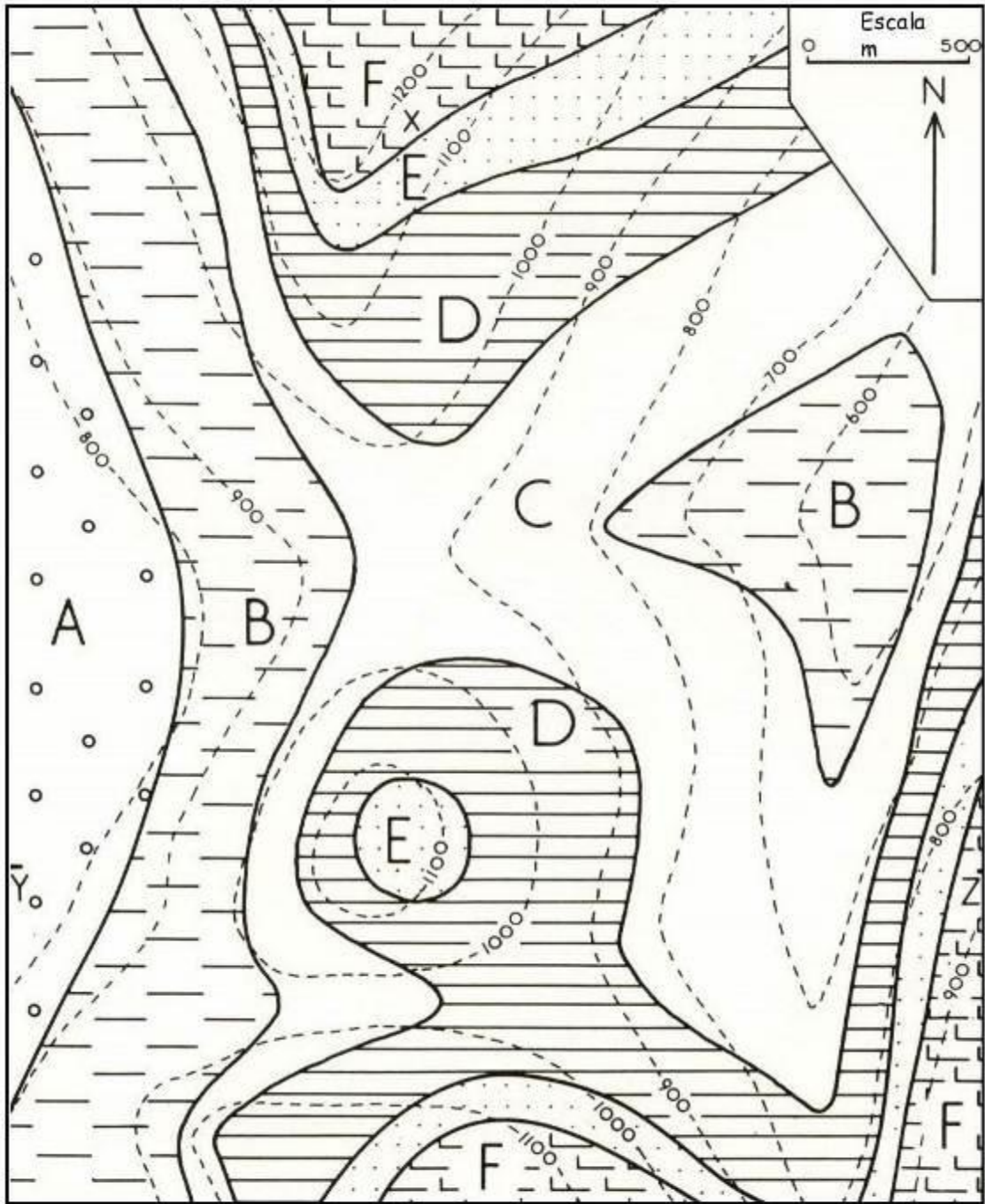


Completar o mapa geológico.

Exercício IV



Solução

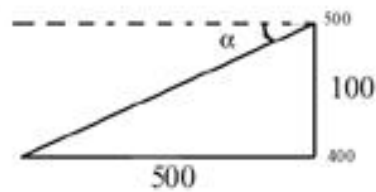


1º) direção e mergulho das camadas.

2º) Calcular a espessura vertical E_v e a espessura verdadeira E das camadas.

Exercício V – Espessura vertical e verdadeira

1º) Mergulho das camadas :

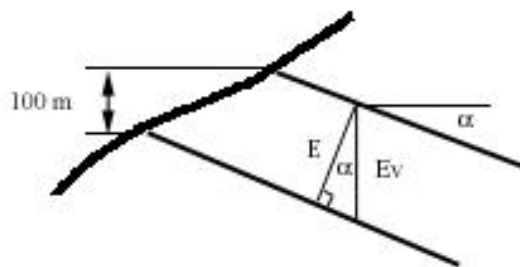


$$\alpha = \tan^{-1} 0,2 = 11,3^\circ$$

2º) Espessura vertical e espessura verdadeira

Nos planos inclinados, a espessura vertical é maior que a espessura verdadeira medida na perpendicular dos contornos geológicos. O ângulo entre a espessura vertical (E_v) e a espessura verdadeira (E) é igual ao ângulo de mergulho α :

$$\cos \alpha = E / E_v \quad \Rightarrow \quad E = E_v \times \cos \alpha$$



No mapa, a linha de azimute 1100 m do contorno estrutural das camadas D-E coincide com a linha de azimute 1000 m do contorno estrutural das camadas C-D. Então, ao longo desta direção, a distância entre o topo e a base da camada D é de 100 metros (E_v).

E_v :	E :
B : 250 m	B : 245,15 m
C : 100 m	C : 98,06 m
D : 100 m	D : 98,06 m
E : 50 m	E : 49,08 m

Solução