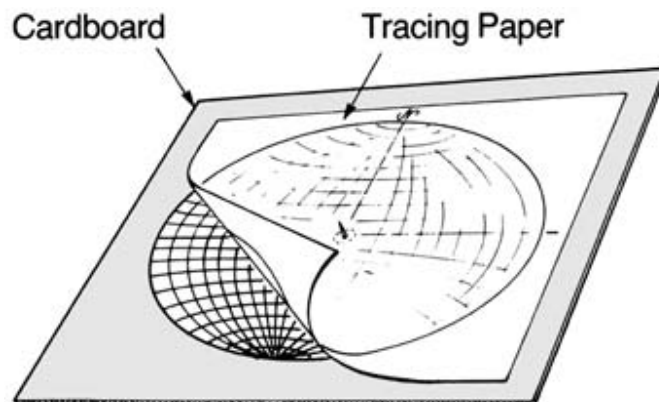


Análise de rochas dobradas em projeções esféricas

GMG0338 – Geologia Estrutural II



Prof. Claudio Salazar Mora

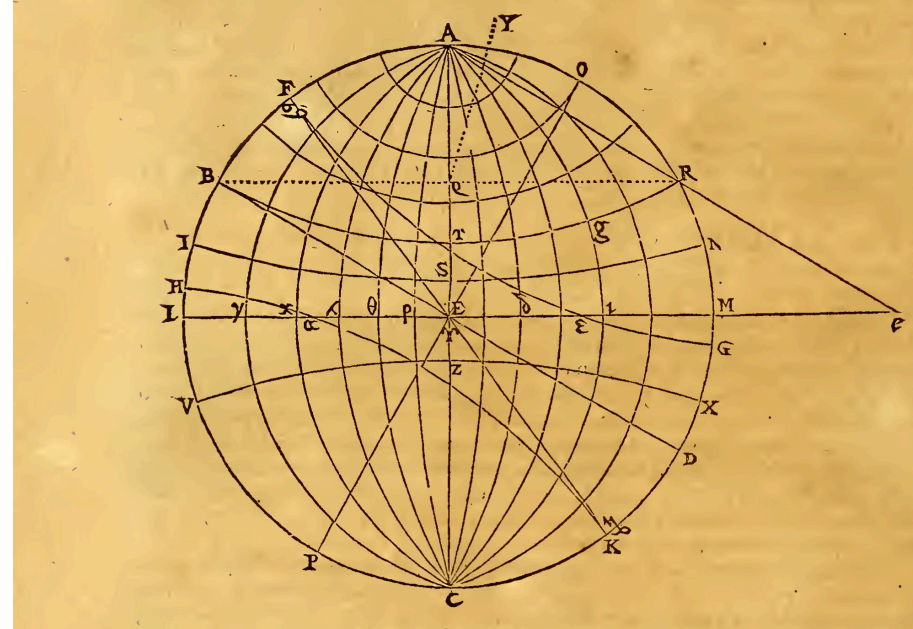
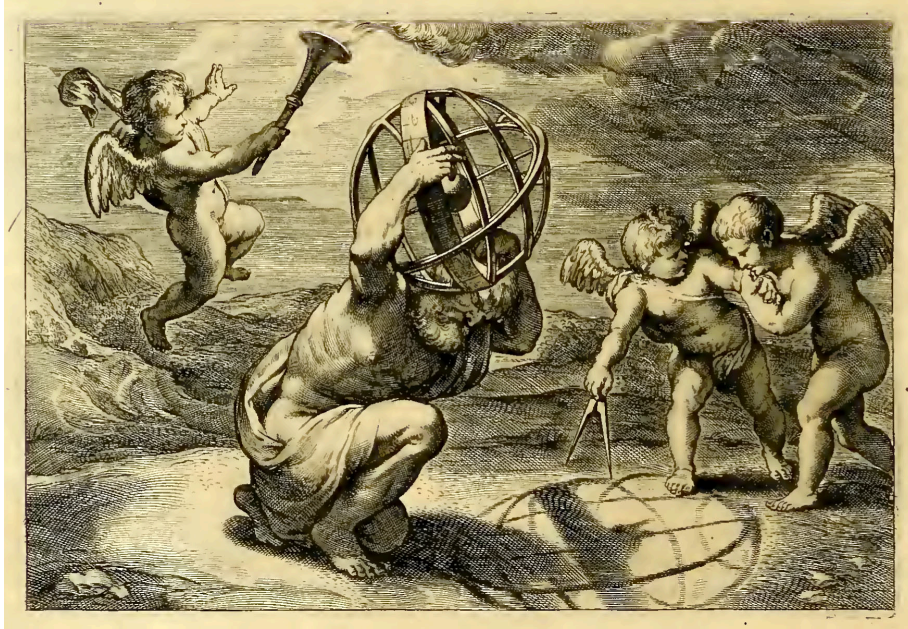
03/09/2020

Temas da aula

1. Projeções esféricas
2. Análise da cilindridade e não-cilindricidades
3. Contornos e estilos de dobras em diagramas Pi
4. Dobras e clivagens
5. Exercício

1. Projeções esféricas

Uma **projeção esférica** é a projeção de uma esfera em um plano:



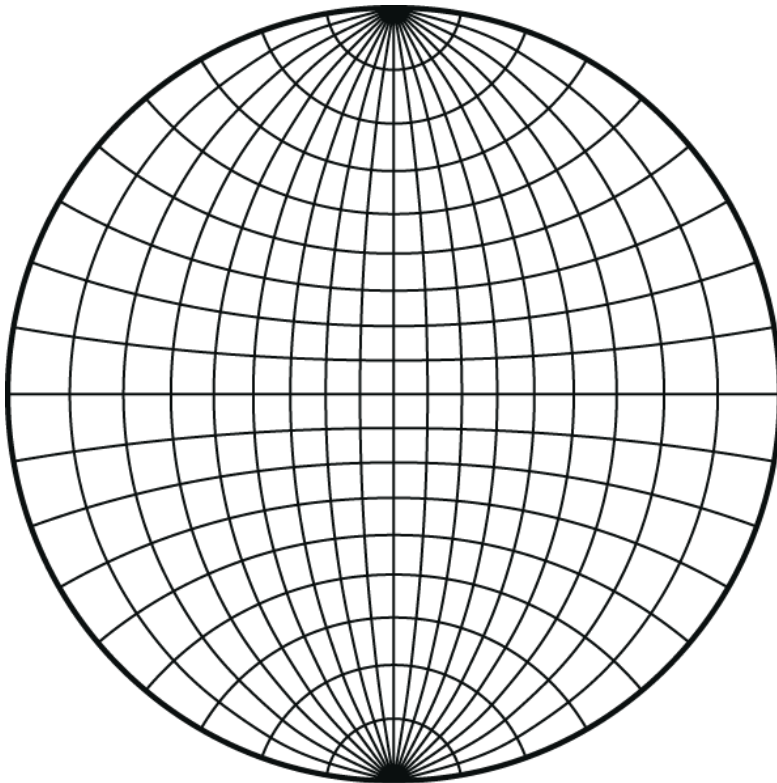
Em 1613, François d'Aguilón cunhou o termo projeção esférica, ilustrando-a com a imagem do deus Atlas segurando um globo, sendo iluminado por trás, e projetado no chão. À direita, d'Aguilón mostra como construir uma **rede estereográfica**.

Retirado do Manual do Software Orient, de Frederick W. Vollmer.

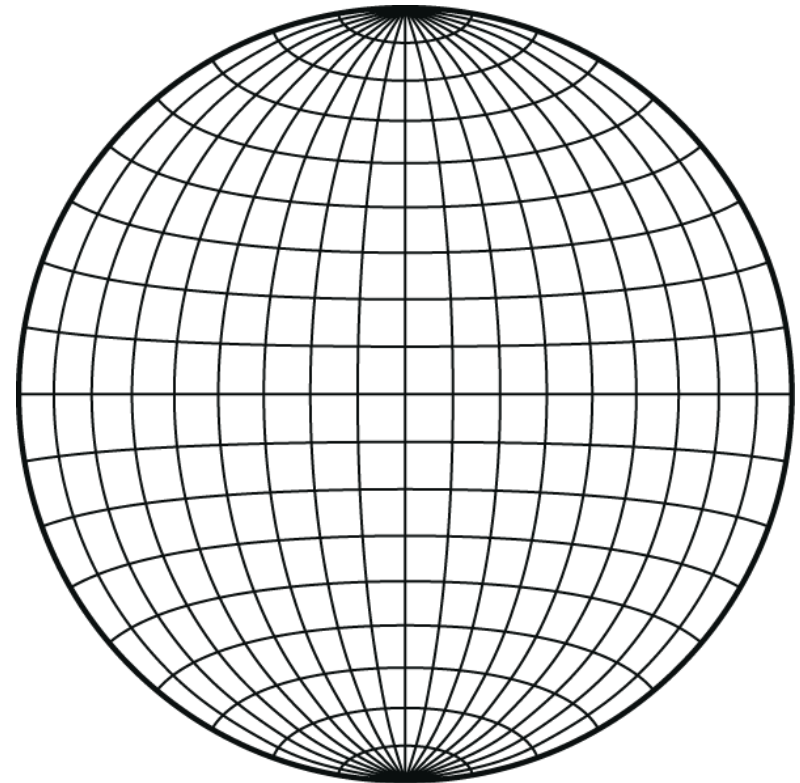
1. Projeções esféricas

As projeções esféricas são feitas através de dois tipos principais de redes:

A rede de Wulff, ou
de igual-ângulo



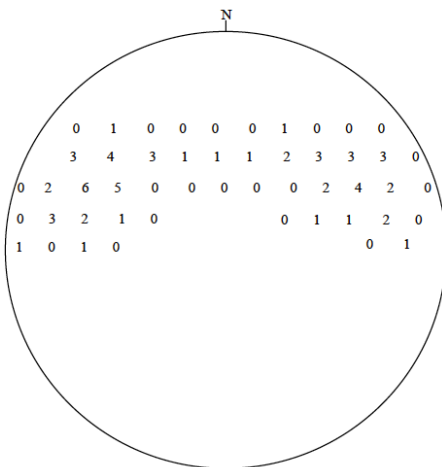
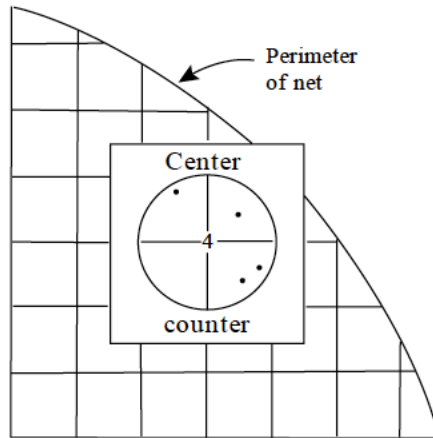
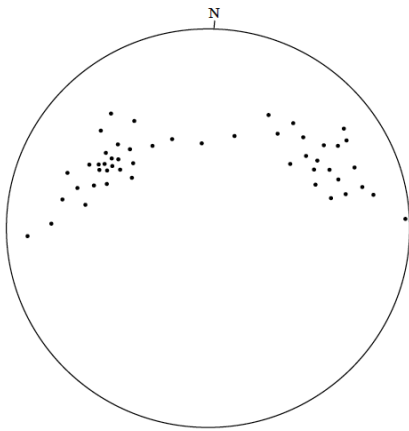
A rede de Schmidt,
ou de igual-área



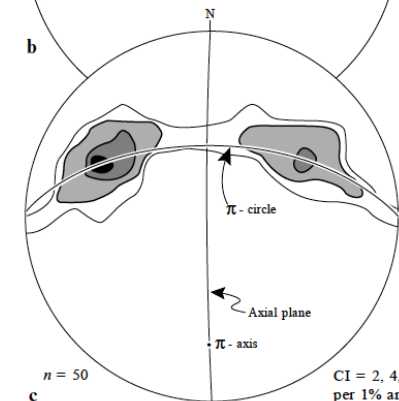
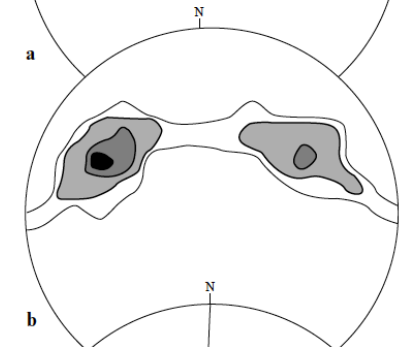
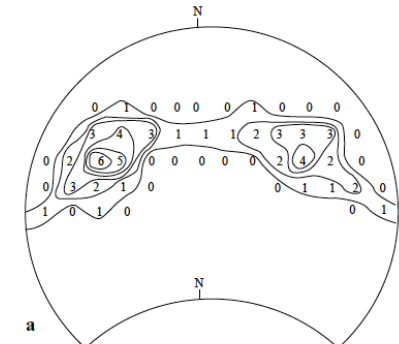
Para geologia estrutural, é mais pertinente que a rede mantenha a área, de modo a não distorcer a análise de densidade dos dados plotados (geralmente projeções polares).

1. Projeções esféricas

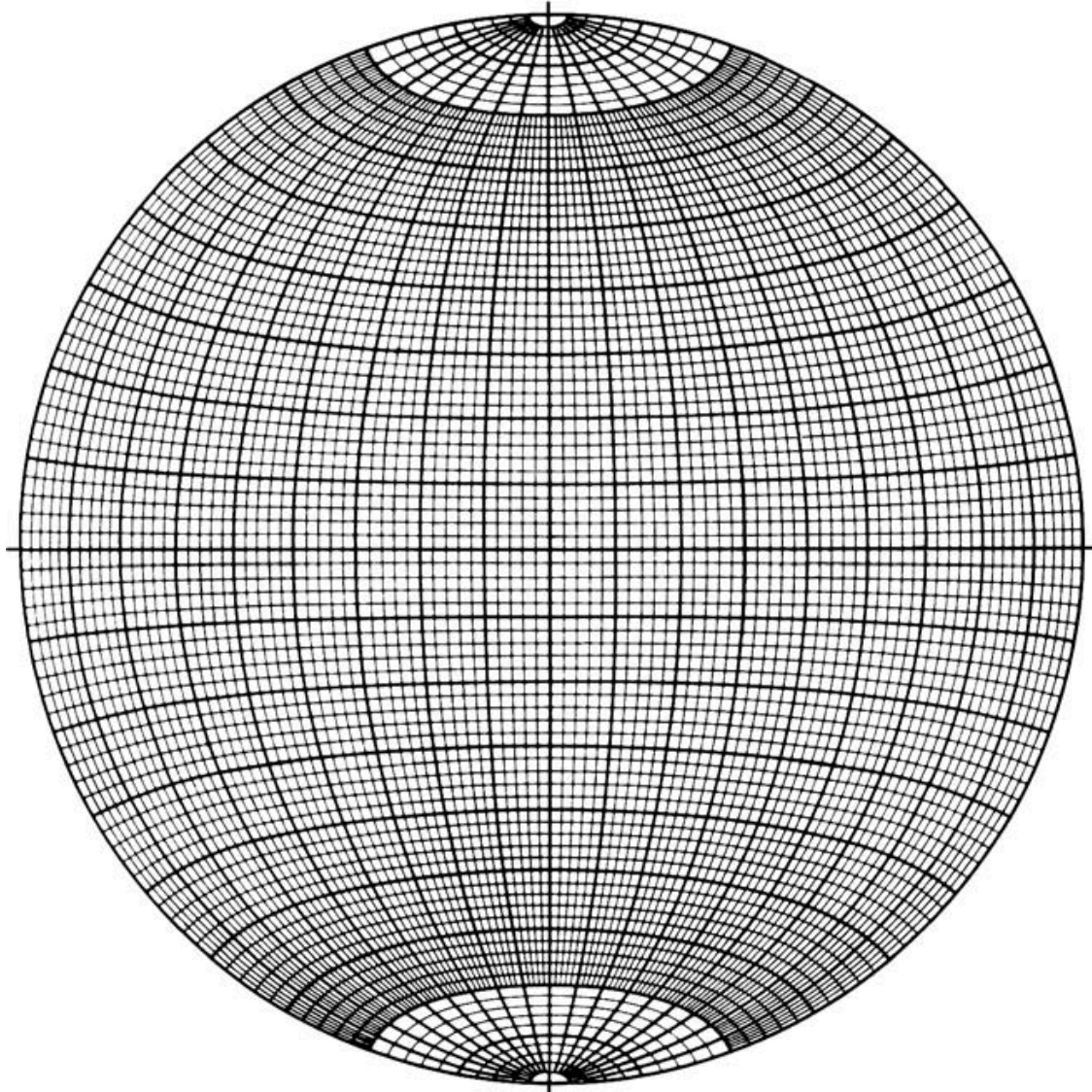
Para preparar, por exemplo, **diagramas de contorno de densidade** de projeções polares de planos, por exemplo, a questão da manutenção da área é importante.



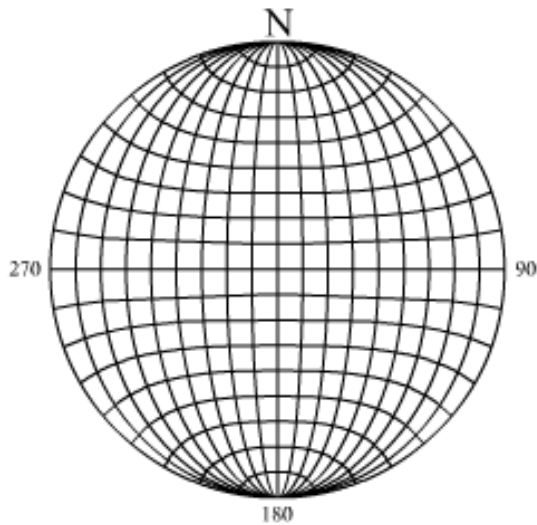
O contador é um círculo que representa 1% da área da rede de Schmidt.



1. Projeções esféricas a rede de Schmidt

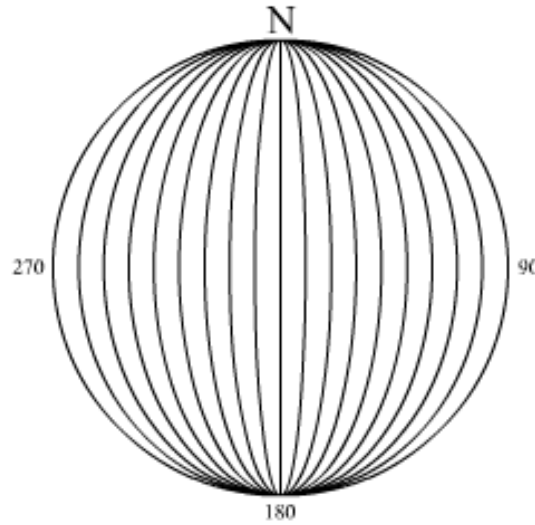


1. Projeções esféricas a rede de Schmidt



Schmidt net

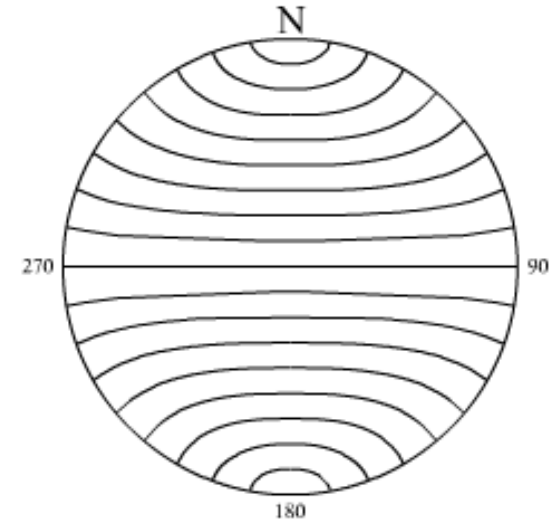
Círculo primitivo ou círculo equatorial de uma esfera!



Great circles

Grandes círculos:

Em 2D, curvas N-S!
Representam famílias de planos com direção N-S cujos mergulhos variam de 0° a 90° !

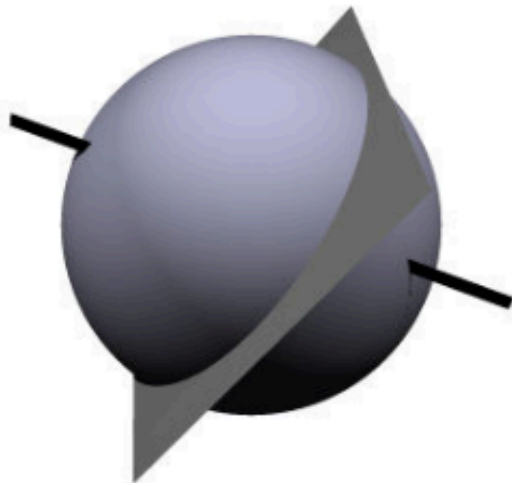


Small circles

Pequenos círculos:

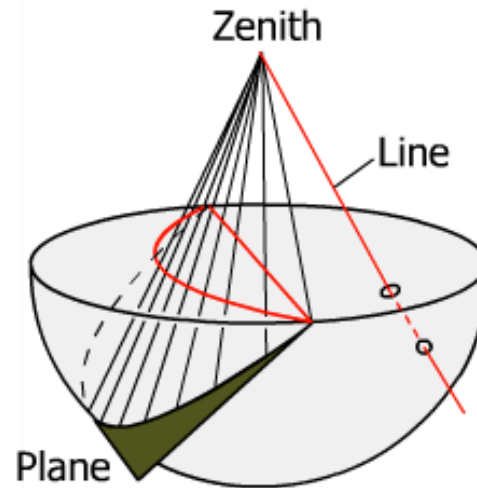
Em 2D, são curvas E-W.
Representam os caminhos seguidos por linhas rotacionadas a partir de um eixo N-S horizontal!

1. Projeções esféricas a rede de Schmidt



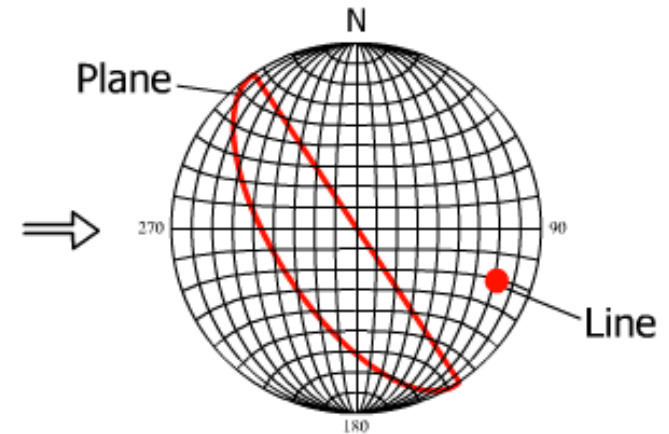
Em 3D

A linha ou plano a serem plotados devem ser imaginados como atravessando o centro de uma ESFERA, a qual é interceptada no seu hemisfério sul.



Projeção para sul

Os planos interceptam o hemisfério sul como um círculo, enquanto que linhas vão interceptar como pontos!



Rede estereográfica em 2D

A projeção dessas intersecções no hemisfério sul são projetadas para o círculo equatorial da esfera (círculo primitivo) ligando-se com o zênite. Quando essa linha cruza o equador, plota-se a projeção da intersecção!

1. Projeções esféricas

Programas de computador (recomendados)

Download Stereonet 11

for Mac OS X, v. 11.0.9

for Windows 64-bit, v. 11.0.9

for Linux 64-bit, v. 11.0.9

for Windows 32-bit, v. 11.0.9

for Linux 32-bit, v. 11.0.9

Download Stereonet 10

These links remain for those of you who need access to the older version. There will be no further updates to v. 10, however.

for Mac OS X, v. 10.4.6 (64-bit)

for Windows v. 10.4.6 (64-bit)

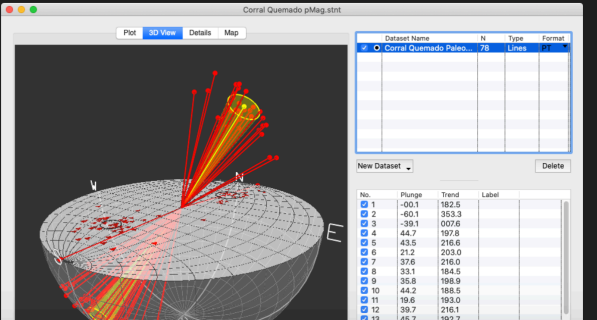
for Linux, v. 10.4.6 (64-bit)

Stereonet 11

Rick Allmendinger


Recent Programs
Stereonet Mobile for iOS »

Stereonet 11 is a huge release with a completely new and robust internal data structure and an OpenGL 3D view of the lower hemisphere for teaching purposes. It includes almost all of the goodness of Stereonet 10 and lots of subtle new tweaks as well (check out the detailed version history, below). This version of Stereonet is compatible with all modern operating systems and has a modern user interface which has been modeled after OSXStereonet for Mac by Nestor Cardozo and me. It can read and write older Stereonet text files, can read the Stereonet 11 binary files, but saves its data in a new binary format.



Dataset Name	N	Type	Format
Corral Quemado Paleo...	78	Lines	11.0.9

No.	Plunge	Trend	Label
1	-00.1	182.5	
2	-60.1	353.3	
3	-39.1	007.6	
4	44.7	197.6	
5	43.5	216.6	
6	21.2	203.0	
7	37.6	216.0	
8	33.1	184.5	
9	35.8	198.9	
10	44.2	188.5	
11	19.6	193.0	
12	39.7	216.1	
13	48.7	180.7	



ORIENT

Downloads

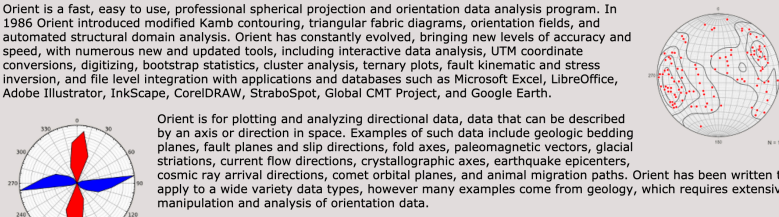
3.12.0
Macintosh
Windows
Linux
User Manual
SHA: M|W|L

3.11.1
Macintosh
Windows
Linux
SHA: M|W|L

3.11.0
Macintosh

Orient is a fast, easy to use, professional spherical projection and orientation data analysis program. In 1986 Orient introduced modified Kamb contouring, triangular fabric diagrams, orientation fields, and automated structural domain analysis. Orient has constantly evolved, bringing new levels of accuracy and speed, with numerous new and updated tools, including interactive data analysis, UTM coordinate conversions, digitizing, bootstrap statistics, cluster analysis, ternary plots, fault kinematic and stress inversion, and file level integration with applications and databases such as Microsoft Excel, LibreOffice, Adobe Illustrator, InkScape, CorelDRAW, StraboSpot, Global CMT Project, and Google Earth.

Orient is for plotting and analyzing directional data, data that can be described by an axis or direction in space. Examples of such data include geologic bedding planes, fault planes and slip directions, fold axes, paleomagnetic vectors, glacial striations, current flow directions, crystallographic axes, earthquake epicenters, cosmic ray arrival directions, comet orbital planes, and animal migration paths. Orient has been written to apply to a wide variety data types, however many examples come from geology, which requires extensive manipulation and analysis of orientation data.



<http://www.frederickvollmer.com/orient/index.html>

<http://www.geo.cornell.edu/geology/faculty/RWA/programs/stereonet.html>

Se você acha que precisa revisar, recomenda-se utilizar o <https://app.visiblegeology.com/stereonetApp.html> para plotar planos (ciclográfica X polar), linhas, ângulos entre duas linhas, dois planos...

Os programas de computador ajudam muito, porém é recomendado que o aluno tenha plotado e manipulado dados estruturais de forma manual para aprender a visualizar e interpretar estereogramas, independentemente de como foram construídos!

1. Projeções esféricas: Stereonet v. 11.1.0

Uma visão inicial do Stereonet v. 11.1.0

The screenshot displays the Stereonet v. 11.1.0 software interface. The main window shows a stereonet plot with a color scale for Percent (ranging from 2 to 32). The plot is titled 'Cylindrical folding.stnt'. The interface includes a menu bar (File, Edit, Data, Calculations, Plot, View, Window, Help) and a toolbar. A 'Controle de visualizações' (Visualization Control) box is overlaid on the plot area. A 'Caixa de listagem de grupos de dados' (Data Group Listing Box) is overlaid on the right side, showing a table of datasets. A 'Caixa de listagem de dados' (Data Listing Box) is overlaid on the bottom right, showing a table of data points. A 'Painel de análises' (Analysis Panel) is overlaid on the bottom left, displaying statistical results for Kamb Contouring and Bingham Analysis.

Controle de visualizações

Caixa de listagem de grupos de dados

Dataset Name	N	Type	Format
polos de supr dobrada.txt	16	Lines	TP
planes from poles to po...	16	Planes	

Caixa de listagem de dados

No.	Trend	Plunge	Label
1	331,0	38,0	
2	333,0	42,0	
3	322,0	42,0	
4	316,0	49,0	
5	302,0	55,0	
6	311,0	53,0	
7	193,0	22,0	
8	199,0	30,0	
9	203,0	36,0	
10	208,0	39,0	
11	208,0	42,0	
12	215,0	41,0	
13			
14			
15			
16			

Área de plotagem

Painel de análises

----- Kamb Contouring | 27/04/20 at 12:00-----
Data set name = polos de supr dobrada.txt
Contour Int. = 2 sigma; Counting Area = 36,0% of net area
Expected Num. = 5.76 Signif. Level = 3 sigma

----- Bingham Analysis | 27/04/20 at 12:01-----
Data set: polos de supr dobrada.txt

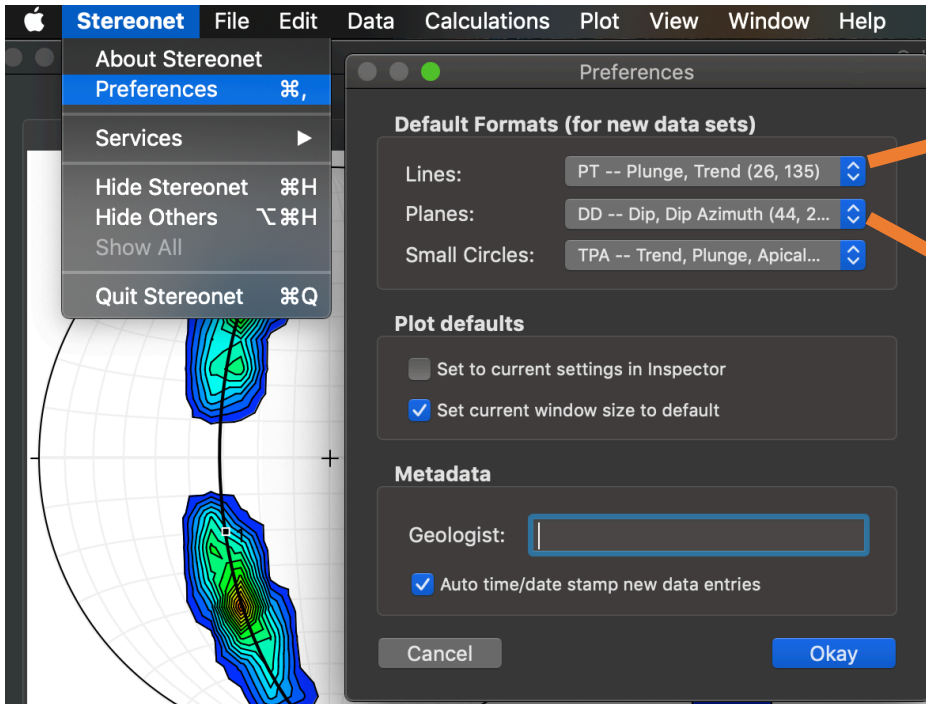
Axis	Eigenvalue	Trend	Plunge	a95 min	a
1.	0,6773	234,9	53,9	N/A	N/A
2.	0,3218	349,2	16,7		
3.	0,0009	089,6	30,9	N/A	N/A

Best fit great circle (strike, dip RHR) = 179,6, 59,1

----- Planes from Poles | 27/04/20 at 12:01 -----

1. Projeções esféricas: Stereonet v. 11.1.0

Verificando o formato dos dados de entrada:



TP -- Trend, Plunge (135, 26)
✓ PT -- Plunge, Trend (26, 135)

AD -- Strike, Dip, Dip Quad (312, 44, W)
AZ -- Strike, Dip RHR (132, 44)
✓ DD -- Dip, Dip Azimuth (44, 222)
DR -- Dip Azimuth, Dip (222, 44)

```
DD  
78,086  
68,084  
41,075  
05,328  
11,337  
11,044  
48,272  
70,268  
80,265  
15,300  
22,070  
75,081  
51,080  
13,066  
72,272  
12,024  
67,082  
62,272  
42,270  
48,278  
57,080  
61,264  
65,078  
63,270
```

Os dados de entrada podem vir em um .txt:

Na primeira linha deve constar: TP ou PT (linhas) ou AD, AZ, DD, ou DR (planos);
Em seguida, os dados devem vir um por linha, separando-se por vírgula os valores.

1. Projeções esféricas: Stereonet v. 11.1.0

Para o exercício associado à aula de hoje, vocês provavelmente vão utilizar:

Calculations >> Poles

Calculations >> Planes from poles

Calculations >> Angle between

Calculations >> Axial Plane Finder

Plot >> Contour

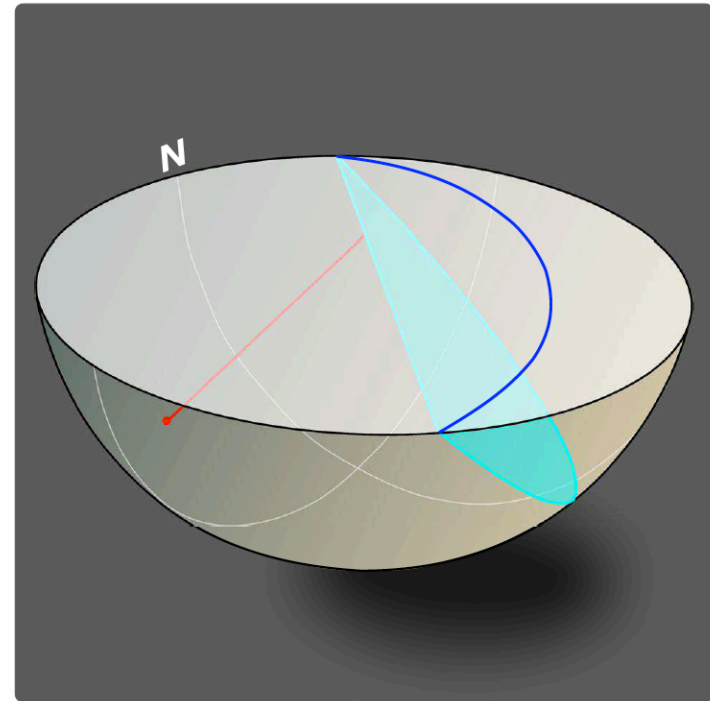
Plot >> Cylindrical Best Fit

View >> Inspector

Stereonet

Stereonet v. 11

by Richard W. Allmendinger © 2020



2. Cilindricidade

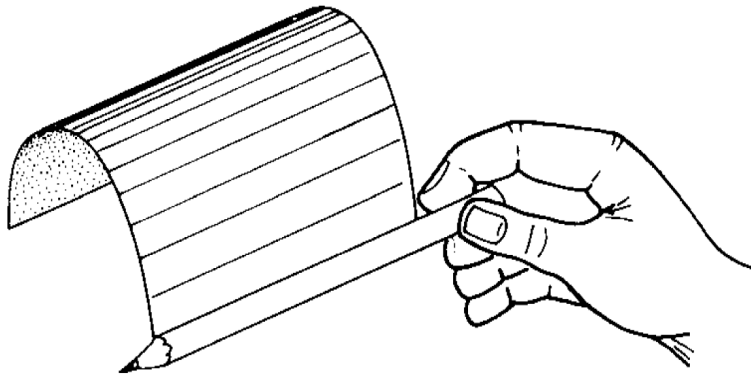
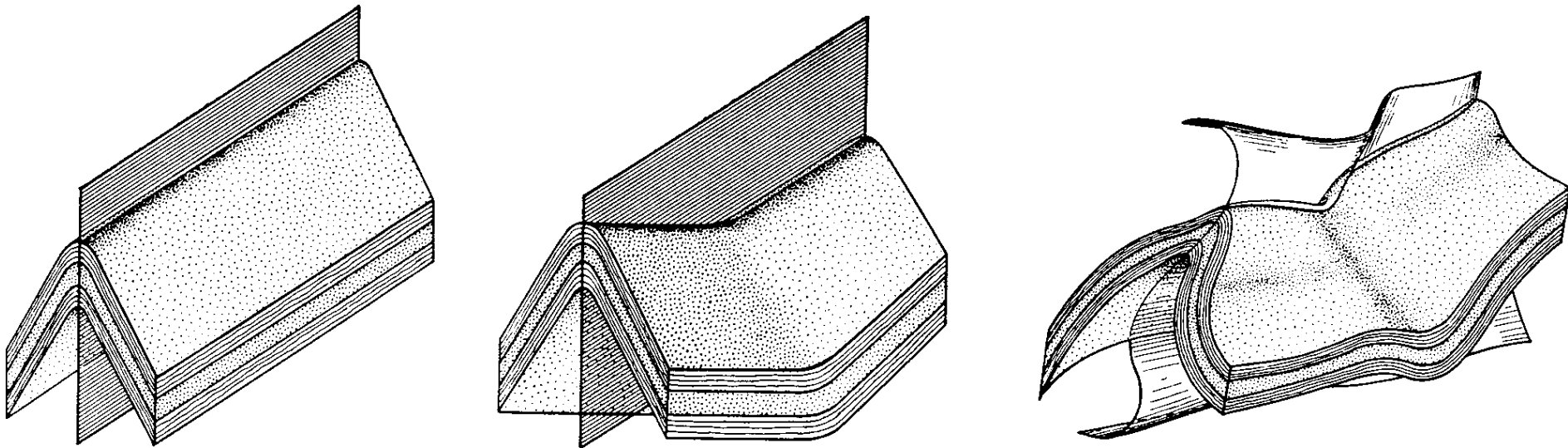


Fig. 3.1 The concept of a cylindrically folded surface.

Uma **dobra cilíndrica** pode ser vista como um cilindro parcialmente aberto.

O eixo desse cilindro é a chamada linha geratriz, ou seja, se rotacionarmos a geratriz no espaço, construímos um cilindro!!

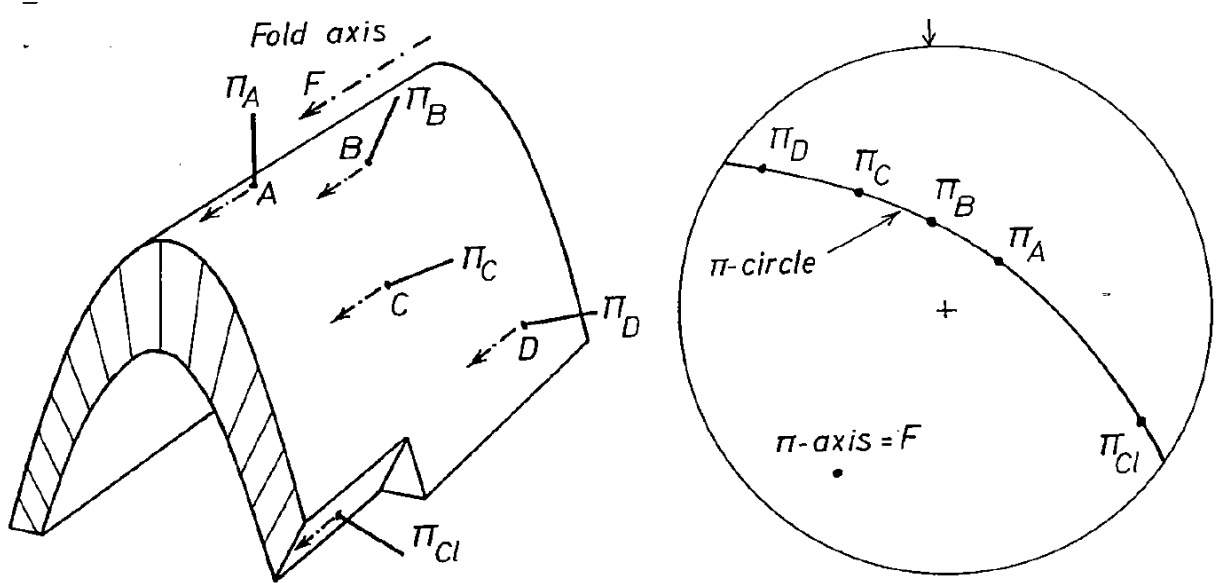


Em dobras cilíndricas, o eixo da dobra é retilíneo.

2. Cilindricidade

Analisando a cilindridade em redes de igual área:

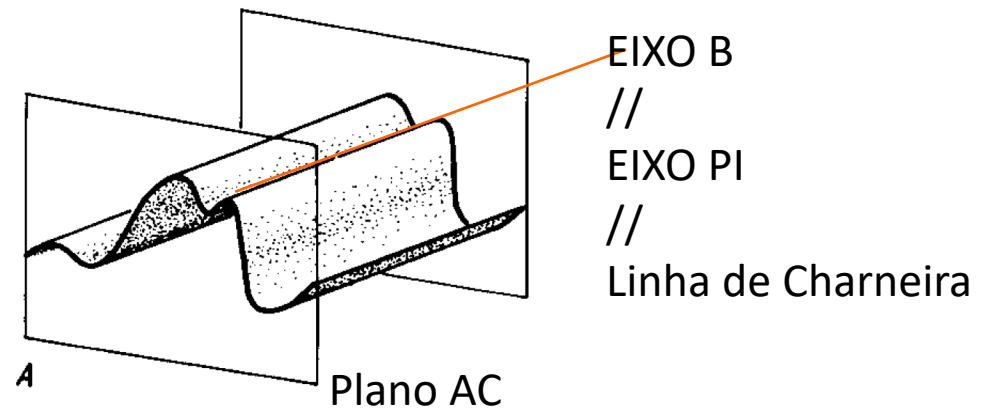
2.1 Os diagramas PI (π): quando medimos vários planos na superfície dobrada cilíndrica e fazemos a projeção esterográfica POLAR dos planos, veremos que eles vão se alinhar em um círculo máximo.



Quando estamos fazendo à mão, plotamos os polos e giramos o papel de seda para ajustar os polos em um grande círculo (ajuste de guirlanda). No Stereonet, utiliza-se o "Cylindrical Best Fit".

Esse grande círculo representa o plano transversal de uma dobra, chamado de plano AC.

O POLO do plano AC é, portanto, o eixo da DOBRA.



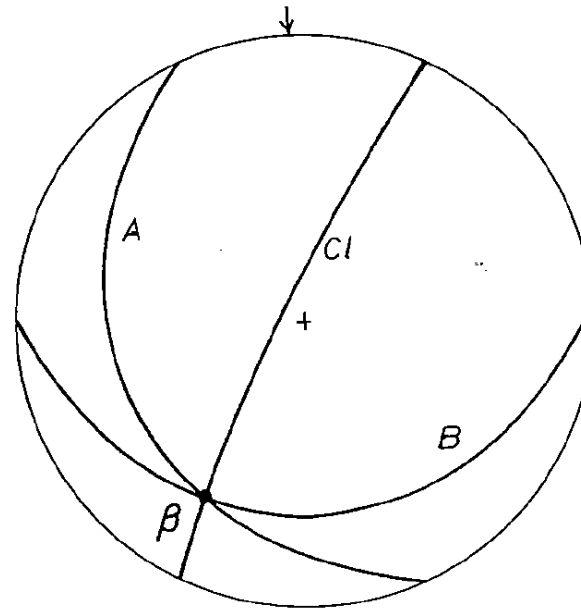
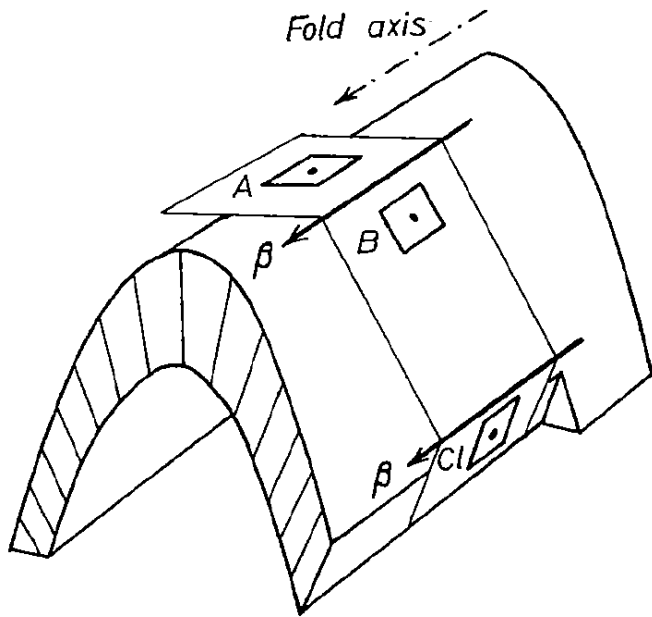
2. Cilindricidade

É muito improvável que dobras naturais sejam perfeitamente cilíndricas, portanto há alguns possíveis critérios que podemos seguir com a ajuda de uma análise em diagramas π :

- **Cilíndrica:** caso mais de 90% dos polos π caiam em $\pm 10^\circ$ do círculo π construído;
- **Subcilíndrica:** caso mais de 90% dos polos π caiam em $\pm 20^\circ$ do círculo π construído;
- **Não-cilíndrica:** caso mais de 90% dos polos π caiam para além dos 20° , então a dobra não é cilíndrica.

2. Cilindricidade

2.2 O diagrama BETA (β): quando medimos vários planos na superfície dobrada *cilíndrica* e fazemos a projeção estereográfica ciclográfica dos planos, veremos que eles vão intersectar em um ponto.



O ponto β indica uma lineação, que é a intersecção de diferentes planos tangentes à superfície dobrada.

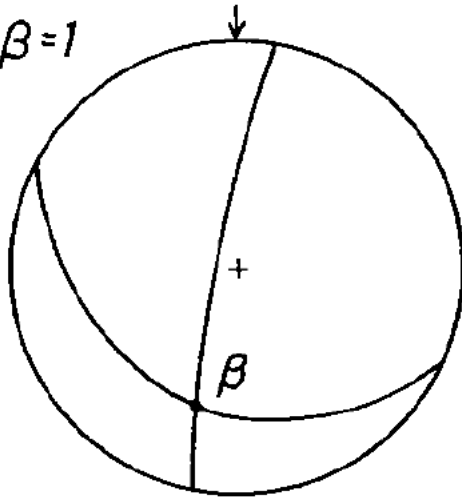
O eixo β construído, é, portanto, paralelo ao eixo da dobra.

2. Cilindricidade

Por mais atrativos que sejam os diagramas β , eles apresentam uma desvantagem:

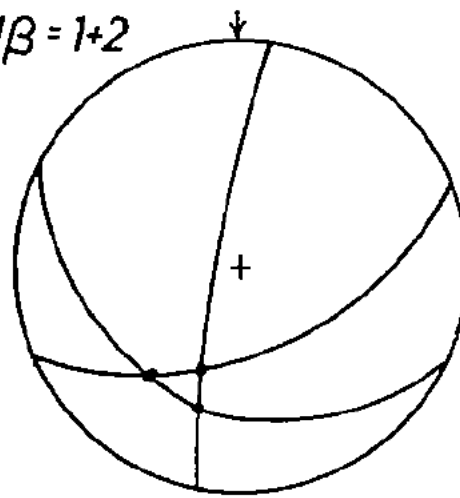
Para dobras que não são perfeitamente cilíndricas (que é maioria), o número de eixos β aumenta com o aumento do número de medidas que temos.

$$n = 2$$
$$N\beta = 1$$



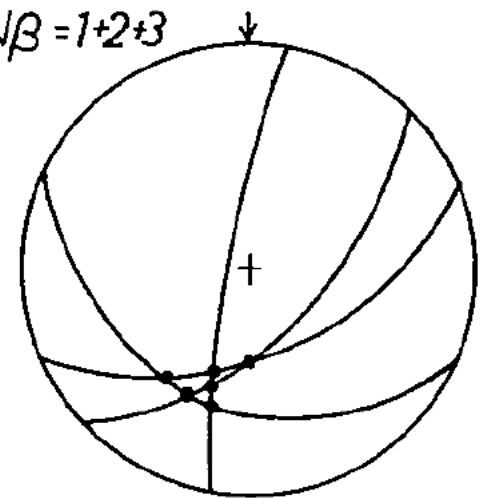
Dois planos, uma intersecção. Aqui, ok.

$$n = 3$$
$$N\beta = 1+2$$



Três planos, três intersecções. Nesse caso, o eixo β seria o ponto médio entre os três...

$$n = 4$$
$$N\beta = 1+2+3$$

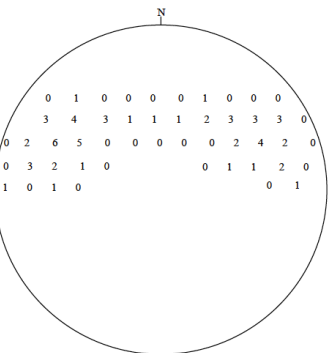
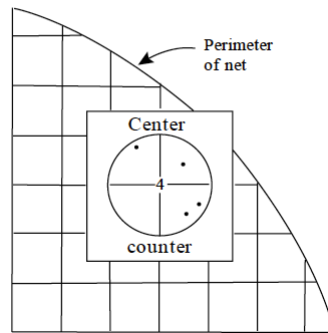
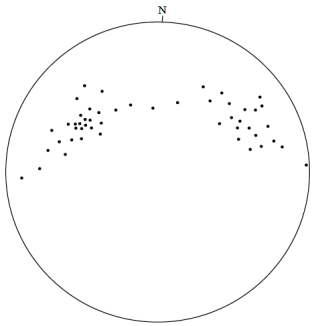


Com 4 plano, já aumenta casa vez mais...

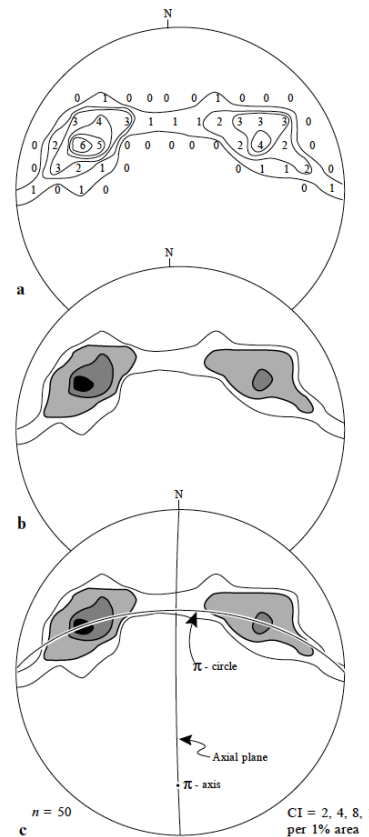
Isso pode ser calculado com $n(n-1)/2$. Se tivermos $n=500$ medidas de planos, por exemplo, teremos 124.750 eixos β ! Portanto, a utilização dos diagramas π são mais recomendadas...

3. Contornos e estilos de dobras

Na natureza, as dobras não são exatamente cilíndricas (mesmo quando se aproximam dessa geometria), portanto não é tão direta a construção de diagramas beta ou pi. Entretanto, com uma grande quantidade de dados estruturais, a orientação de uma linha de charneira pode ser estatisticamente determinada através diagramas de contorno de densidades.



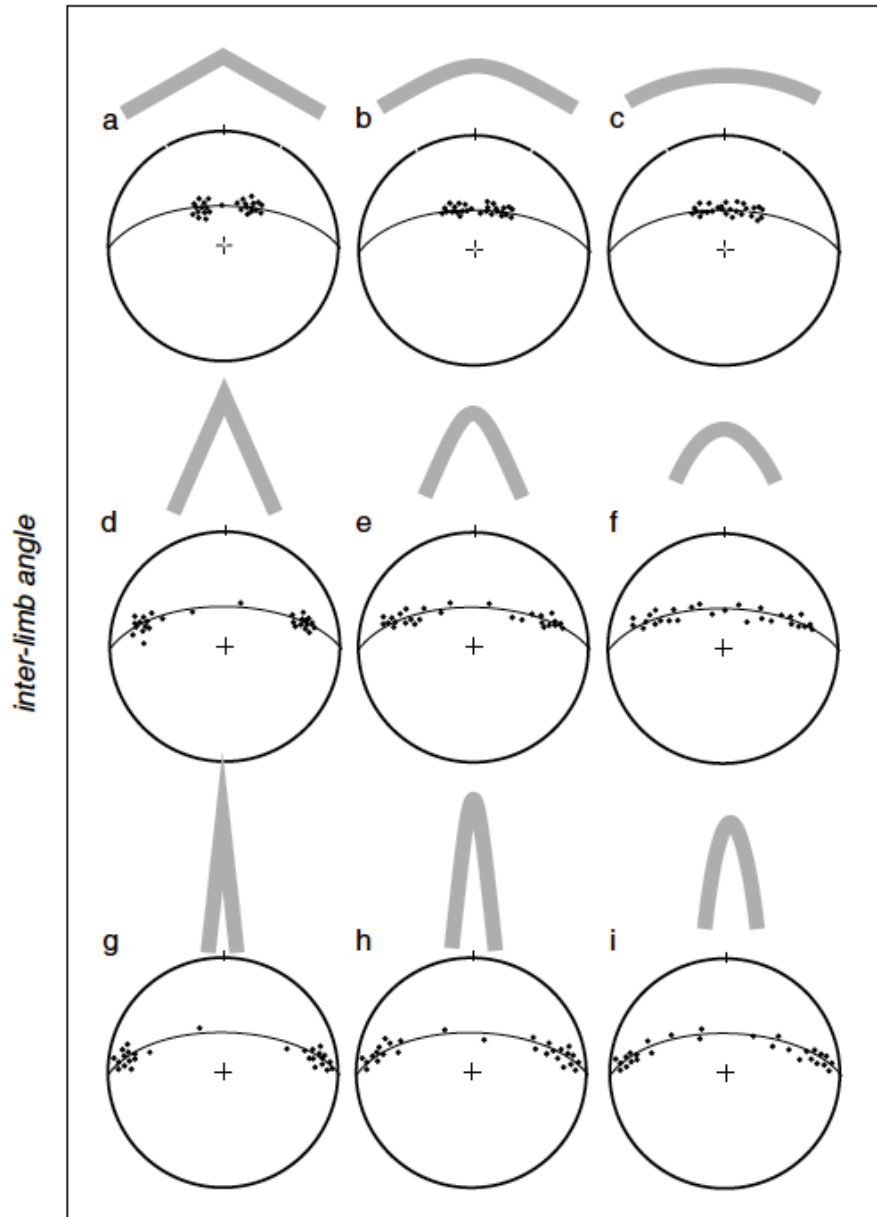
O contador é uma esfera que representa 1% da área da rede de Schmidt.



O Stereonet apresenta alguns métodos de para geração desses contornos de densidade.

3. Contornos e estilos de dobras

curvature distribution



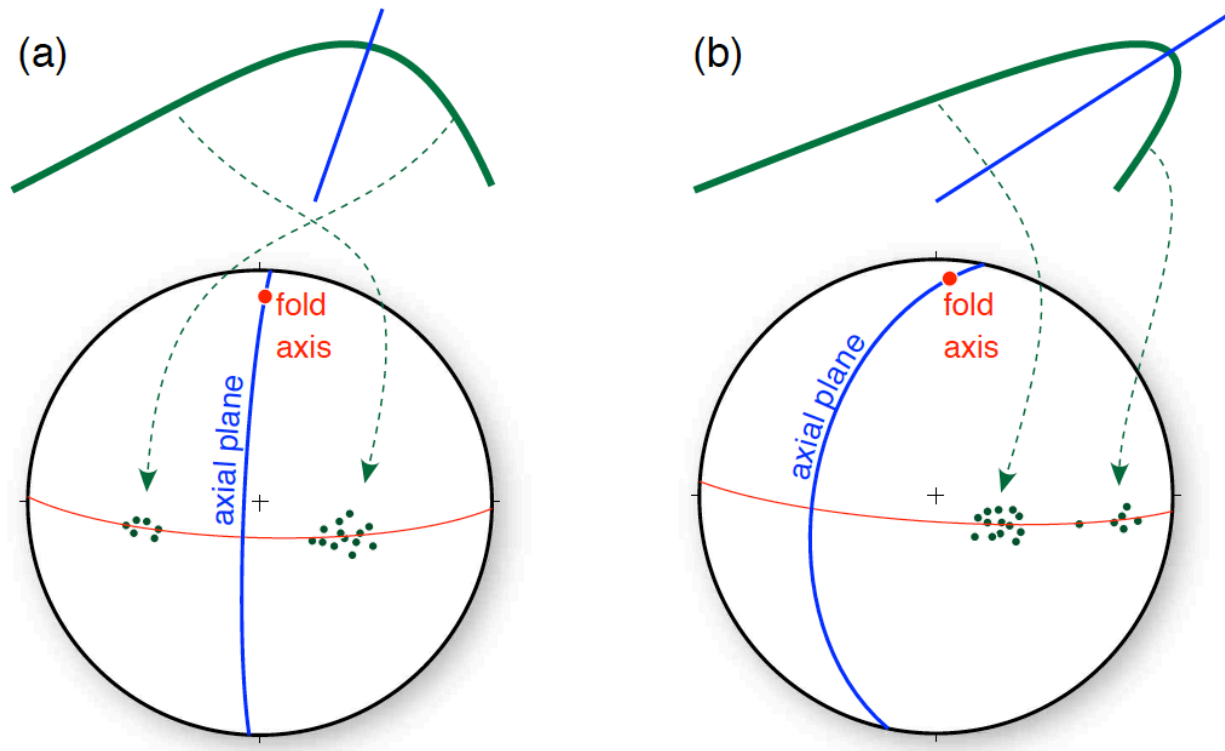
- Dobras mais **abertas** mostram um menor espalhamento dos polos da superfície dobrada (**a, b, c**);
- Observar que partes dos grandes círculos sem polos reflete dobras mais abertas, enquanto que grandes círculos com maiores espalhamentos, refletem dobras mais fechadas;
- O **grau de agrupamento** dos polos reflete a curvatura das dobras:

Dois agrupamentos claros de polos (a, d, g) identificam dobras com flancos mais retos e zonas de charneira mais agudas (chevrons?)

Padrões de agrupamentos mais difusos (e, f, i) mostram dobras mais arredondadas (mais próximo do cilíndrico).

3. Contornos e estilos de dobras

Simetria e assimetria das dobras: como dobras assimétricas tem flancos de diferentes comprimentos, é esperado que o flanco invertido (ou curto) tenha menos dados e portanto apresente um menor agrupamento em relação ao flanco longo

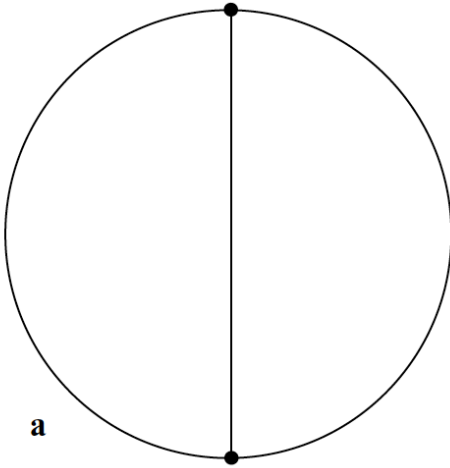


Para a dobra quase vertical, o plano axial vai ser a bissetriz do ângulo agudo formado entre os flancos (concentrações dos polos)

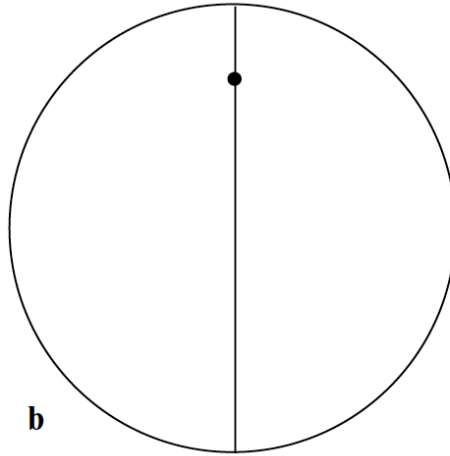
Já para uma dobra assimétrica com flanco invertido, o plano axial será a bissetriz do ângulo obtuso formado pelas concentrações dos polos dos flancos

3. Contornos e estilos de dobras

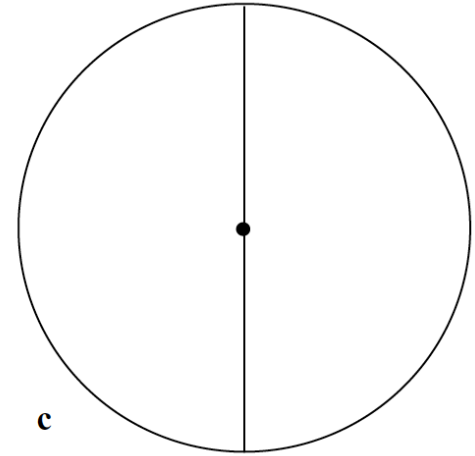
A **orientação** das dobras pode ser descrita através do seu **eixo** e **plano axial**:



a

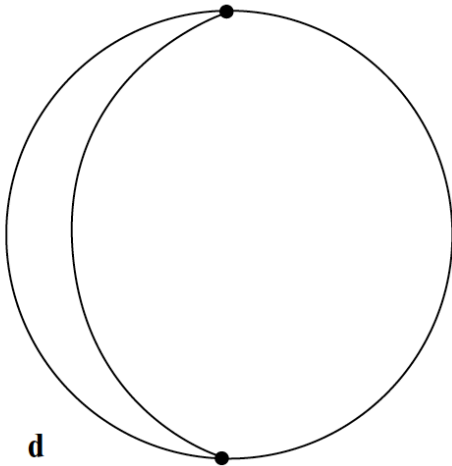


b

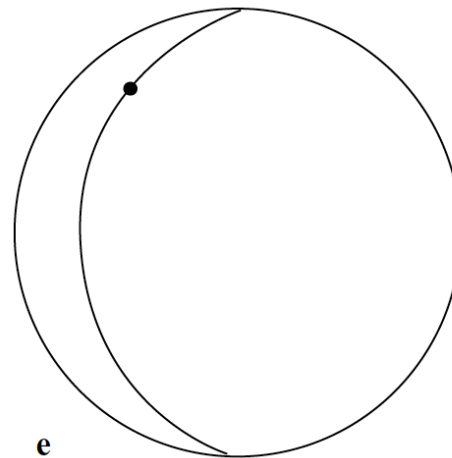


c

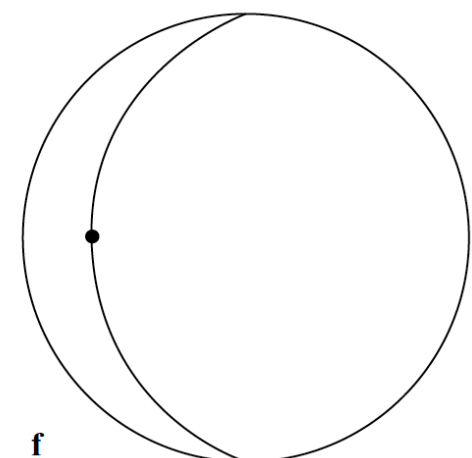
Ax. pl.: vertical
Axis: horizontal



d



e



f

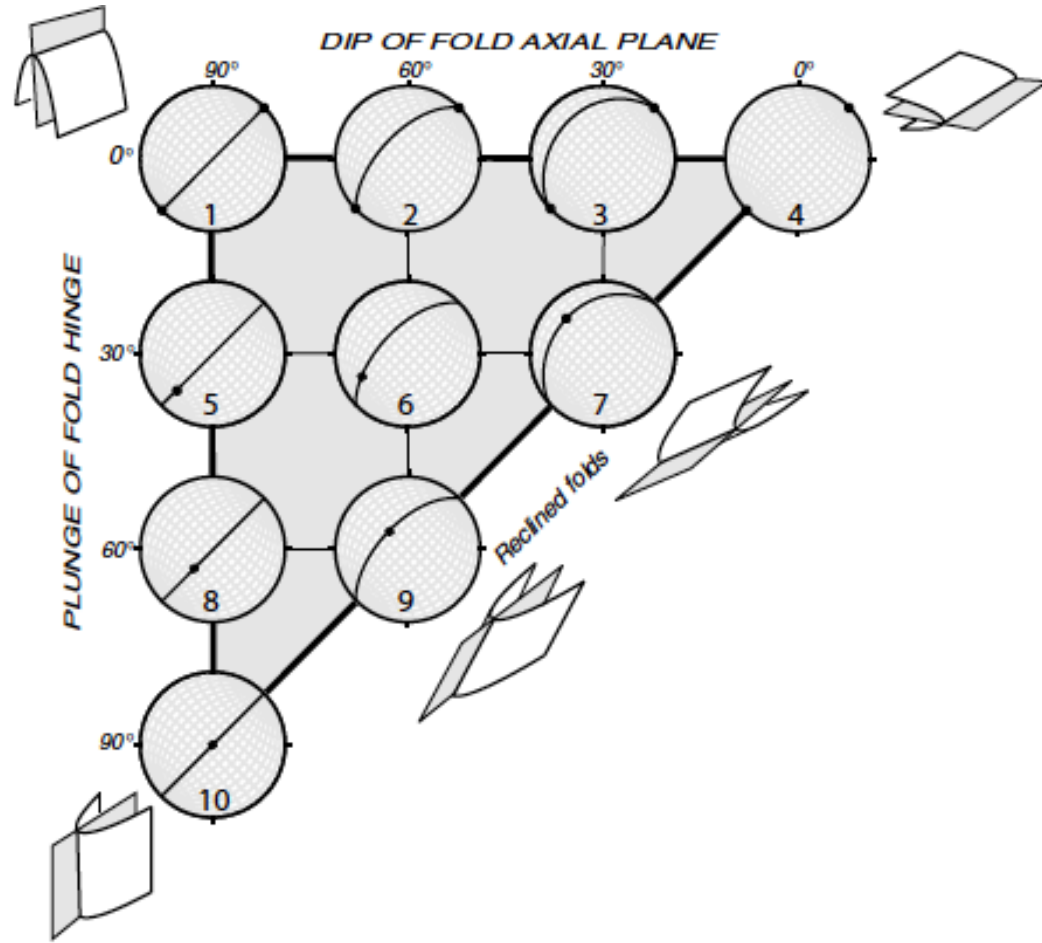
3. Contornos e estilos de dobras

Classification based on plunge

Plunge	Class	Stereograms in Fig. 25d
0-10°	non-plunging	1, 2, 3 and 4
10°	gently plunging	
30°	moderately plunging	5, 6, and 7
60°	steeply plunging	8 and 9
80-90°	vertical fold	10

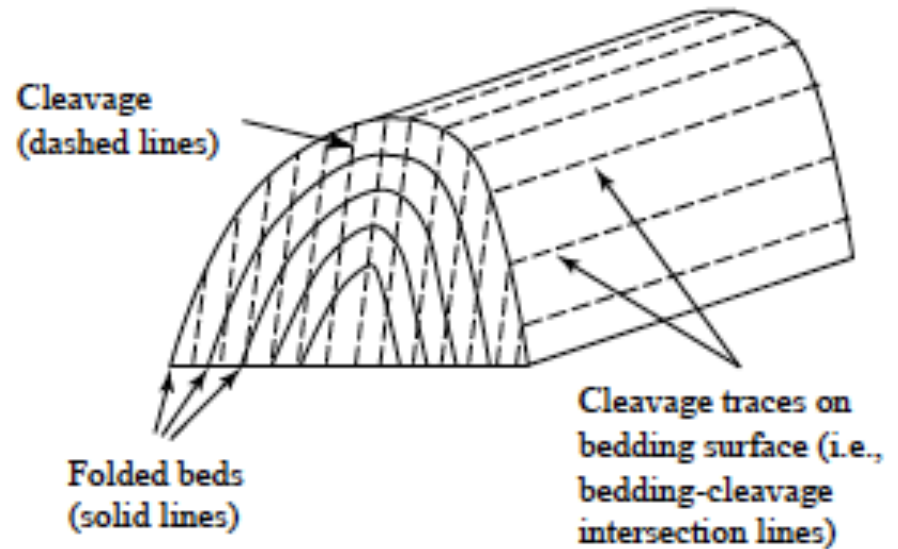
Classification based on dip of axial surface

Dip	Class	Stereograms in Fig. 25d
0-10°	recumbent	4
10°	gently inclined	
30°	moderately inclined	3 and 7
60°	steeply inclined	2, 6 and 9
80°		
80-90°	upright fold	1, 5, 8 and 10



4. Dobras e clivagens

Uma clivagem ou foliação pode ser desenvolvida de **forma (sub)-paralela** ao plano axial de dobras regionais (tomar cuidado com as clivagens que se dispõem em leque...):

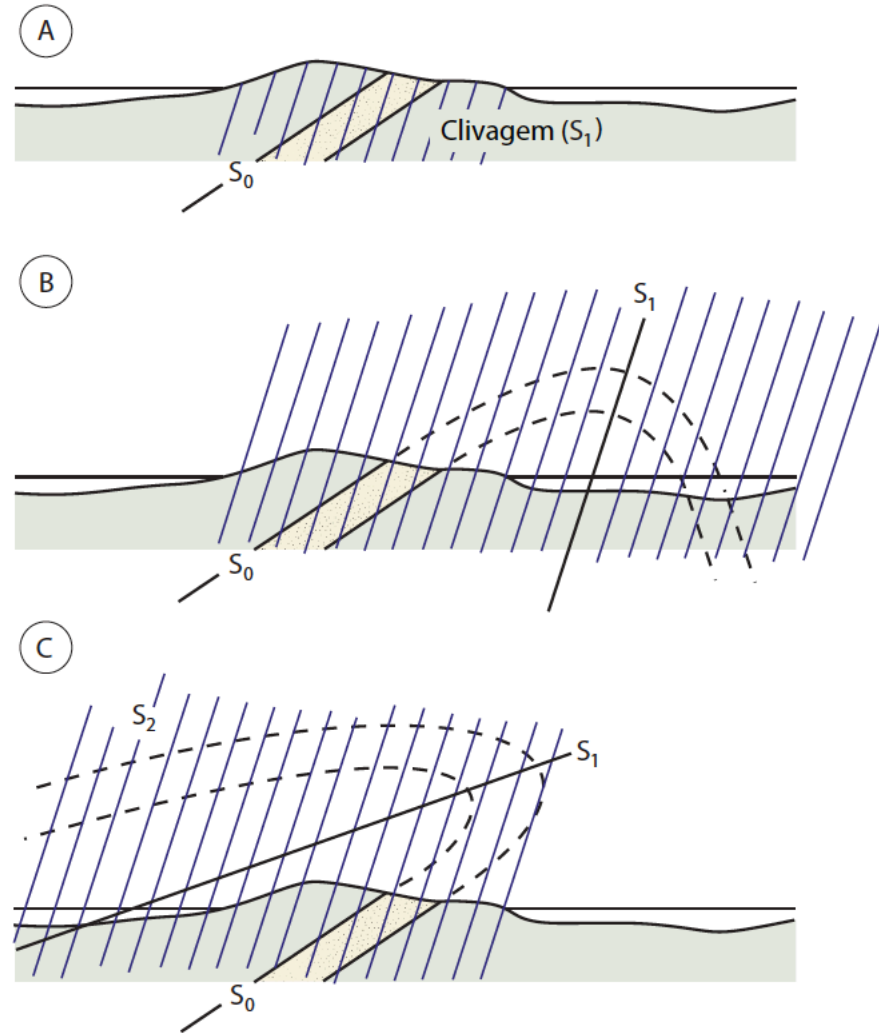


4. Dobras e clivagens



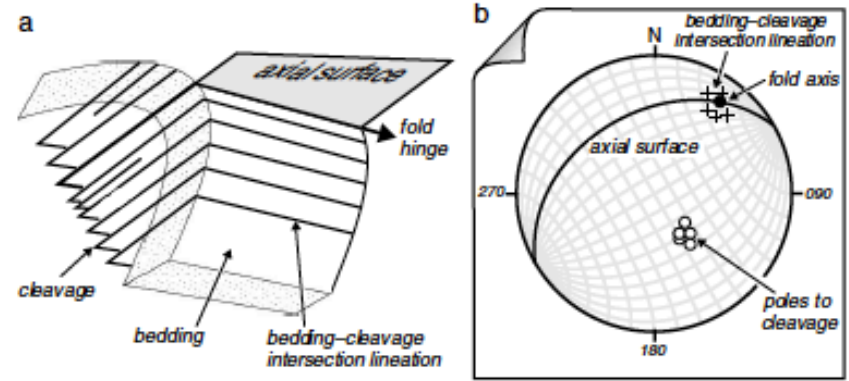
Fig 13.17

A) Relação entre clivagem e acamamento em uma área deformada. (B) Interpretação de uma dobra de larga escala, considerando que haja uma relação entre a clivagem e a dobra. Se a dobra apresentar uma forma completamente diferente (C), então dobra e clivagem devem ser relacionadas a episódios diferentes de deformação



4. Dobras e clivagens

a) Clivagens (sub)-paralelas ao plano axial: ver o estereograma em b)



c) Clivagens em leque: ver o estereograma d), onde os polos das clivagens vão de dispersar em um grande círculo e lineações de intersecção estão paralelas ao eixo da dobra

e) Clivagens oblíquas ao eixo da dobra, intersecção não é paralela ao eixo.

Porque isso pode ocorrer?

Clivagem se desenvolveu quando o acamamento já estava dobrado. Superposição?

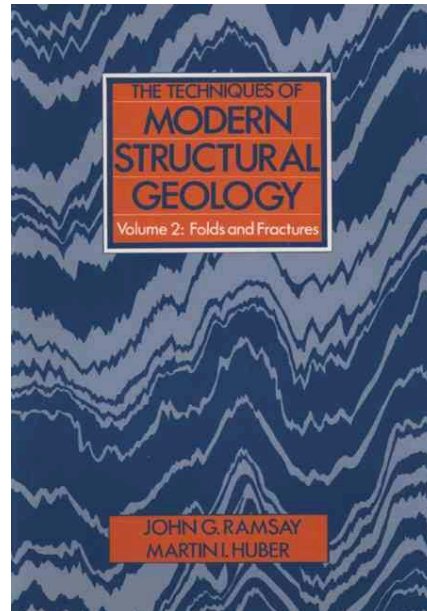
Resumindo

Enfim, esse tipo de análise é muito útil quando:

- Estamos trabalhando com estruturas em escalas regionais
- Quando as estruturas de larga escala são pouco expostas
- Queremos encontrar padrões ou subdomínios estruturais
- Queremos correlacionar domínios, mapas e etc

Na próxima aula, serão mostradas estruturas que estão associadas aos eixos β dos dobramentos...

Referências



Leitura necessária: session 16 “Fold orientations: projection techniques”

