

sympo = 0778724

Anais do XXXV Congresso Brasileiro de Geologia, Belém, Pará, 1988, V.4

PROGRAMA DE COMPUTAÇÃO PARA TRATAMENTO INTERATIVO DE DADOS ESTRUTURAIS

Ginaldo Ademar da Cruz Campanha - IPT

Naohiko Nagata - IPT

Jorge Kazuo Yamamoto - IPT

ABSTRACT

This paper presents a computer program written in TURBO-PASCAL for IBM-PC compatible microcomputers. The program makes interactive analysis of structural data either stored on memory or on disk files in order to find a significative data set of an homogeneous structural domain. The main program is composed of procedures for edition and management of structural data files, projection on Schmidt-Lambert diagram, statistical calculation of tridimensional orientation data, and finally for printing and transmission of data files to other computers. The graphical procedures make cyclographic projection on Schmidt-Lambert diagram besides of poles of planes and lineations. The statistical procedures allow the determination of average concentration, the plane of best fit (e.g. the best π axis when it is for folding analysis), the type and the scattering of structural data distribution. This paper also presents new normalized numbers to determine the type and scattering of the sample.

INTRODUÇÃO

O principal objetivo deste trabalho foi o desenvolvimento de um programa de computação para tratamento interativo de dados estruturais capaz de configurar um conjunto de dados representativo de um domínio estrutural homogêneo, através da manipulação de arquivos armazenados em disco e/ou introduzidos diretamente pelo teclado.

Os primeiros trabalhos realizados no IPT de tratamento gráfico de dados estruturais foram desenvolvidos em microcomputador TEKTRONIX acoplado a plotter. Foram então elaboradas rotinas em BASIC para plotagem em redes de igual área (diagrama Schmidt-Lambert) de lineações, polos de planos, projeções ciclográficas e de curvas de densidade de polos por área do diagrama. Estas rotinas foram denominadas de programa TRADE (YAMAMOTO & PEREIRA JR. 1984). Recentemente, este foi adaptado para microcomputadores compatíveis com IBM-PC, acoplados a plotter.

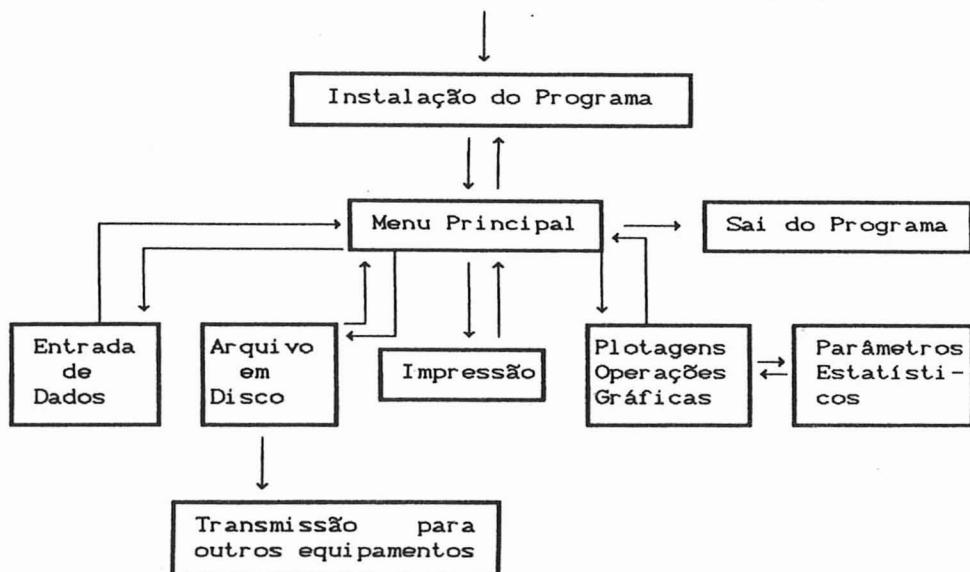
Por outro lado, o programa aqui apresentado surgiu do diagnóstico feito da potencialidade de um melhor aproveitamento dos recursos de museu de dados armazenados em discos flexíveis. Surgiu particularmente da necessidade sentida em levantamentos geológico-estruturais de detalhe e semidetalhe, de se dispor de um banco de dados estruturais organizado por ponto ou estação de medida, e por tipo de estrutura medida. Associou-se a esse banco de dados uma série de rotinas gráficas

de plotagem de dados estruturais em diagrama Schmidt-Lambert, e rotinas de cálculo estatístico baseadas num método bastante poderoso, fundamentado no conceito do tensor orientação. O programa foi desenvolvido originalmente em BASIC APPLESOFT, para microcomputadores compatíveis com Apple II+ (CAMPANHA & YAMAMOTO 1987). A versão aqui apresentada foi desenvolvida em TURBO PASCAL para microcomputadores compatíveis com IBM-PC.

A construção em tela gráfica e impressora matricial de curvas de contorno de isofreqüência de pontos por área nos diagramas foi considerada pouco prática, devido ao pequeno tamanho da tela gráfica, à baixa resolução e, à demora do processamento. Esta deficiência no entanto foi em parte compensada pela instalação das rotinas de cálculos estatísticos para dados orientados tridimensionalmente, que permite a caracterização numérica das distribuições de dados, a determinação de direções médias e guirlandas, e a comparação entre si das distribuições. Estas análises eram feitas antes de modo qualitativo, com auxílio das curvas de isofreqüência.

CARACTERÍSTICAS GERAIS

O diagrama abaixo mostra a estrutura básica do programa.



A principal característica do programa é a facilidade de manipulação de arquivos em discos e/ou dados introduzidos diretamente pelo teclado. Sua utilização se dá através de uma série de mensagens auto explicativas, dispostas em geral nas forma de "menus".

Cada arquivo é dividido em campos, os quais armazenam conjuntos distintos de dados. Uma utilização típica desta estrutura é o armazenamento dos dados de um afloramento num arquivo. O nome do arquivo pode ser o código do afloramento. Cada campo pode corresponder a um tipo de estrutura geológica medida, e o nome do campo pode ser o nome ou o código da estrutura. O usuário pode também utilizar esta estrutura de arquivo de outra forma, como melhor lhe convier.

Os arquivos podem ser lidos, listados no monitor ou impressora, antes de serem carregados na matriz de dados da memória. Isto permite ao usuário carregar na memória somente os arquivos que realmente lhe interessam.

O carregamento de dados na memória é feito sempre de forma acumulativa, ou seja, os dados novos são acrescentados ao conjunto já existente. Esta forma de entrada de dados permite a combinação dos dados de diferentes arquivos e/ou diferentes campos. Uma vez carregados, os dados podem ser plotados em diagrama Schmidt-Lambert e visualizados no monitor, copiados para a impressora e/ou para arquivos

em disco. Podem ainda ser calculados diversos parâmetros estatísticos relacionados à distribuição dos dados. Todas estas operações, executadas interativamente pelo usuário, permitem chegar a uma configuração final de um conjunto de dados representativo de um domínio estrutural homogêneo.

Os dados de entrada devem estar na forma de rumo azimutal e ângulo de caiamento (plunge) de lineações, ou rumo azimutal do mergulho e ângulo de mergulho de planos (forma CLAR).

Os resultados são apresentados na forma de rede de igual área, cujo raio pode ser determinado pelo usuário. Os dados de planos podem ser apresentados na forma de polos ou projeções ciclográficas (Figura 6), sendo impresso o nome do diagrama (fornecido pelo usuário) e o número de dados. Podem ser feitas plotagens sobrepostas de dados ("overlays"). Os resultados estatísticos são fornecidos na forma de três planos ortogonais entre si (três planos de elipsóide do tensor orientação), que guardam relação direta com a simetria da distribuição, e cuja intersecção 1 (autovetor 1) corresponde ao vetor médio da distribuição, e a intersecção 3 (autovetor 3) ao eixo π (Figura 7). São listados os seguintes parâmetros estatísticos: número de dados (ND), forma de distribuição (FD), dispersão (DD), os três autovalores e a orientação (na forma CLAR) dos três autovetores.

CONSIDERAÇÕES TEÓRICAS

Representação Gráfica e Métodos Estatísticos de Análise de Dados de Orientação.

A forma mais adequada de representação gráfica de dados de orientação tridimensional é feita usando projeções estereográficas em diagramas, tais como a rede de Wulff e a de igual área (rede de Schmidt-Lambert). Para dados tridimensionais, formas como a rosácea e histogramas de mergulho ou do azimute do rumo têm pouco significado, já que, isoladamente, nem o rumo nem o mergulho de um plano ou linha são suficientes para caracterizar sua orientação no espaço, e nem correspondem a parâmetros com algum significado especial.

As análises estruturais quantitativas são feitas normalmente com o recurso de diagramas de trama. Em geral as estruturas lineares ou as retas normais (polos) de estruturas planares são plotadas em redes de igual área (Schmidt-Lambert), podendo ou não serem traçadas curvas de contorno de densidade de pontos versus área. Os padrões de distribuição obtidos são então analisados qualitativamente, quanto à forma da distribuição (unimodal, polimodal, guirlanda de círculo máximo, guirlanda de círculo mínimo, etc.) e sua dispersão.

Existem já há algum tempo programas de computador para o traçado automático de diagramas de trama (ver por exemplo YAMAMOTO & PEREIRA JR. 1984). Menos conhecidos no entanto (e também mais embrionários) são os métodos estatísticos numéricos aplicados na análise estrutural, que são incluídos num campo que pode ser denominado estatística de dados direcionais (MARDIA 1972, ver também WATSON 1965 e CHEENEY 1983).

Diversos métodos têm sido propostos também para a determinação numérica do melhor ajuste para círculos máximos e círculos mínimos, os quais têm aplicação para a determinação de eixos para dobramentos cilíndricos e cónicos, respectivamente (ver CRUDEN & CHARLESWORTH 1972). Diversos métodos não produzem resultados satisfatórios, incluindo aquele proposto por RAMSAY (1967).

Dos vários métodos, um dos que produzem melhores resultados é aquele proposto por SCHEIDEGGER (1965) e WATSON (1965), o qual parte da definição de um Tensor Orientação. Este método fornece resultados precisos e confiáveis e permite a dedução de índices bastante úteis para a comparação entre amostras distintas. Exige um trabalho exaustivo de cálculo se for feito manualmente, o que é contornável pela utilização de computador ou calculadora programável.

Tensor orientação

As atitudes de lineações e polos de planos podem ser tratadas como

vetores unitários com relação a um sistema de coordenadas triortogonal. Sua orientação pode ser definida por três cossenos diretores (l , m , n) com relação a cada eixo. Tomando-se um conjunto de vetores, pode-se demonstrar que a determinação de um eixo ou de um plano, de melhor ajuste, com relação aos quais a somatória dos quadrados dos desvios angulares (Figura 1) dos vetores seja mínima (ou máxima), pode ser obtida pela determinação dos autovalores e autovetores da matriz:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} \sum l_i^2 & \sum l_i m_i & \sum l_i n_i \\ \sum m_i l_i & \sum m_i^2 & \sum m_i n_i \\ \sum n_i l_i & \sum n_i m_i & \sum n_i^2 \end{bmatrix}$$

A determinação dos autovalores consiste na determinação de um λ tal que:

$$\begin{vmatrix} \sum l_i^2 - \lambda & \sum l_i m_i & \sum l_i n_i \\ \sum m_i l_i & \sum m_i^2 - \lambda & \sum m_i n_i \\ \sum n_i l_i & \sum n_i m_i & \sum n_i^2 - \lambda \end{vmatrix} = 0$$

O desenvolvimento desse determinante conduz a uma equação de terceiro grau, que no caso geral deve ter três raízes reais e positivas denominadas autovalores. A cada um desses três autovalores encontra-se associado um autovetor, sendo os três autovetores perpendiculares entre si (t_1 , t_2 , t_3). O vetor associado ao maior autovalor indicará a orientação da concentração média da distribuição, enquanto que o vetor associado ao menor autovalor indicará a normal do melhor plano que contenha o conjunto de vetores $\{V_i\}$, ou seja, no caso da análise de dobramentos, indicará o melhor eixo π . O autovetor associado ao autovalor intermediário será perpendicular a esses dois. (Figura 2).

A matriz normalizada, ou seja, cujos elementos são divididos pelo número N de dados, corresponde a um Tensor Orientação (SCHEIDEGGER 1965):

$$\tau = \frac{a_{ij}}{N}$$

Os autovalores assim determinados correspondem a varianças angulares na três direções principais:

$$S_1^2 = \frac{\lambda_1}{N}$$

$$S_2^2 = \frac{\lambda_2}{N}$$

$$S_3^2 = \frac{\lambda_3}{N}$$

Os três autovetores definem um elipsóide (que é a representação quádrica de um tensor de 2ª ordem). Os semi-eixos desse elipsóide tem como comprimento $\sqrt{S_1^2}$, $\sqrt{S_2^2}$ e $\sqrt{S_3^2}$. Estas três grandezas são os "desvios padrões angulares principais" e serão denotadas por S_1 , S_2 e S_3 .

As propriedades matemáticas do Tensor Orientação são as mesmas de outras grandezas físicas do tipo tensor de 2ª ordem, tais como o esforço mecânico (stress), a deformação interna (strain), o índice de refração em minerais, etc. O desenvolvimento matemático mais geral das propriedades físicas tipo tensoriais pode ser encontrado em NYE (1957).

Relações entre os autovalores e a distribuição de índices existentes.

A determinação dos autovetores permite então a dedução da concentração média e do plano de melhor ajuste de uma distribuição de dados de orientação. É conveniente ainda o estabelecimento de índices que permitam comparar a forma e a dispersão de distribuições de dados orientados.

As relações entre os autovalores permitem inferir o tipo de distribuição dos dados.

Normalmente, temos que:

$$\lambda_1 > \lambda_2 > \lambda_3$$

No caso particular de $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3$, a distribuição é aleatória ou uniforme, ou, dito de outra forma, não há nenhuma orientação preferencial. O elipsóide de orientação é uma esfera.

No caso em que λ_1 é grande e λ_2 e λ_3 são comparativamente pequenos, temos uma distribuição tendente a unimodal, sendo o "elipsóide de orientação" do tipo alongado. Se $\lambda_2 = \lambda_3$, tem-se uma simetria rotacional em torno do autovetor t_1 , associado ao maior autovalor (λ_1).

No caso de λ_1 e λ_2 serem grandes, comparativamente com λ_3 pequeno, a distribuição é em guirlanda. Ou seja, os vetores (V_i) distribuem-se segundo um plano. O elipsóide de orientação é do tipo achatado. No caso de $\lambda_1 = \lambda_2$, a guirlanda não apresenta nenhuma concentração máxima, e mostra uma simetria rotacional em torno do autovetor t_3 , associado ao menor autovalor λ_3 .

Este tipo de relação entre os autovalores tem levado alguns autores a propor índices que descrevem a distribuição.

Como na verdade interessam as relações entre os autovalores, uma alternativa é a utilização de um diagrama semelhante ao de Flinn, amplamente usado em Geologia Estrutural na representação dos vários tipos de elipsóides de deformação interna (strain). Esta técnica foi adotada por HARVEY & FERGUSON (1978), WOODCOCK (1977) e WOODCOCK & NAYLOR (1983).

WOODCOCK (1977) adota nesse diagrama como ordenada a relação $\ln(S_1^2/S_2^2)$ e como abscissa a relação $\ln(S_2^2/S_3^2)$, similarmente à modificação proposta por RAMSAY (1967) para o diagrama de Flinn (Figura 3). No gráfico assim construído as distribuições de polos do tipo unimodais simétricas vão coincidir com a ordenada, já que vão possuir $S_2 = S_3$, e portanto $\ln(S_2^2/S_3^2) = 0$. As distribuições tipo guirlanda simétrica (guirlanda contínua, sem nenhuma concentração de polos dentro do círculo máximo) vão coincidir com a abscissa, já que neste caso $S_1 = S_2$ e $\ln(S_1^2/S_2^2) = 0$. As distribuições aleatórias vão coincidir com a origem (0,0) do gráfico, já que $S_1 = S_2 = S_3$ e portanto $\ln(S_1^2/S_2^2) = \ln(S_2^2/S_3^2) = 0$.

Quanto mais próximas portanto da abscissa as distribuições aproximam-se mais das guirlandas simétricas. Quanto mais próximas da ordenada, aproximam-se mais das unimodais simétricas. O restante do gráfico é ocupado por distribuições que apresentam características híbridas (Figura 3).

Pode-se definir o índice (WOODCOCK 1967):

$$k = \frac{\ln(S_1^2/S_2^2)}{\ln(S_2^2/S_3^2)}$$

o qual corresponde à pendente das diversas retas que passam pela origem (0,0) do gráfico. Quando $K = 1$, temos um caso exatamente intermediário entre as distribuições unimodais e guirlanda. Se $1 > k > 0$ a distribuição tende para guirlanda, tanto mais perfeita quanto mais k se aproximar de zero. Se $\infty \geq k > 1$ a distribuição tende para unimodal, tanto mais perfeita quanto k se aproximar de infinito.

O índice k refere-se à forma da distribuição. Pode-se notar também que quanto mais próximas da origem, mais dispersas são as distribuições, e quanto mais afastadas, maior a orientação

preferencial, dentro de uma reta com mesmo índice k. É possível então definir um índice C, que indica a dispersão da amostra (WOODCOCK 1977):

$$C = \ln(S_1^2/S_3^2)$$

Uma distribuição aleatória (uniforme) apresentará índice C = 0 (e k = 1), e quanto maior for a orientação preferencial, tanto mais C tenderá a infinito.

WOODCOCK & NAYLOR (1983) estabeleceram um teste estatístico para o índice C, para indicar se a distribuição possui ou não uma orientação preferencial significativa. Anteriormente, ANDERSON & STEPHENS (1972) propuseram teste semelhante, porém levando em conta ou o autovalor S_3 , ou o S_1 , necessitando-se conhecer antes a forma da distribuição, se unimodal ou guirlanda. No teste proposto por WOODCOCK & NAYLOR (1983) os valores críticos de C são dispostos em tabela e gráfico para tamanhos de amostras variando entre 5 e 1000, para quatro níveis de confiança.

Os índices de forma (k) e dispersão (C) propostos por WOODCOCK (1977), e também os de HARVEY & FERGUSON (1978), tem a desvantagem de variar entre zero e infinito. Adaptando a proposição de HSU (1966) originalmente concebida para o estudo de deformação interna (strain), propõe-se aqui o seguinte índice de forma da distribuição:

$$F = \frac{2 \ln S_2 - \ln S_1 - \ln S_3}{\ln S_1 - \ln S_3}$$

A vantagem é que este índice varia de -1 a +1, mostrando as seguintes relações com o índice k (WOODCOCK 1977):

<u>Forma da distribuição</u>	<u>k</u>	<u>F</u>
guirlanda simétrica	0	+1
intermediária	1	0
unimodal simétrica	∞	-1

As relações entre estes índices podem ser assim estabelecidas:

$$F = \frac{1 - k}{1 + k} \quad \text{ou} \quad k = \frac{1 - F}{1 + F}$$

No diagrama proposto por HSU (1966) o índice referido é plotado num diagrama em forma de semi-círculo, versus o menor autovalor, representado como raio de semi-círculo. No caso do tensor de orientação, este raio representaria o índice de dispersão da distribuição (Figura 4). Conforme já comentado por WOODCOCK (1977), ao invés de utilizar-se o menor ou o maior autovalor, pode-se utilizar mais proveitosamente, uma relação entre eles:

$$C = \ln(S_1^2/S_3^2)$$

O índice C tem também a desvantagem de variar entre 0 e infinito. Propõe-se aqui um índice D tal que:

$$D = \frac{\ln(S_1^2/S_3^2)}{\ln(S_1^2/S_3^2) + 1} = \frac{\ln(S_1^2/S_3^2)}{\ln(S_1^2/S_3^2) + 2}$$

que mantém as seguintes relações com o índice k:

<u>distribuição</u>	<u>C</u>	<u>D</u>
aleatória	0	0
perfeita	∞	1

A relação entre os dois índices pode ser assim estabelecida:

$$D = C/(C + 2) \quad \text{ou} \quad C = -2D/(D - 1)$$

Estes dois índices, de forma (F) e de dispersão (D) podem ser plotados num diagrama em forma de semi-círculo (Figura 4).

O índice k proposto refere-se apenas a distribuições que variam

entre unimodais e guirlandas nos casos extremos com simetria axial, e nos casos intermediários configurando alguma combinação das duas com simetria ortorrômbica. O método na verdade funciona bem com distribuições de simetria esférica (aleatória), axial e ortorrômbica, quando então os autovetores coincidem com eixos de simetria, porém não com distribuições de simetrias monoclinicas ou triclinicas. (Figura 5).

No caso de distribuições assimétricas, o autovetor que representa a concentração média da distribuição estará deslocado com relação à concentração de densidade máxima ("moda") dos dados orientados.

Problemas de interpretação também surgem com distribuições bimodais ou polimodais (e.g., diagramas de juntas), assim como tramas de guirlandas cruzadas (e.g., diagramas de petrofábrica) (Figura 5).

Deve-se notar no entanto que nestes casos os autovetores correspondem a "centros de gravidade" entre as famílias de dados.

Distribuições em guirlanda de círculo mínimo (e.g., dobras cônicas) representam um problema especial de interpretação. Quando a assimetria é ortorrômbica ou axial, um autovetor coincide com o eixo de guirlanda. Para tramas axiais este autovetor é associado ao maior autovalor se o círculo mínimo possui um raio menor que 55°, e com o menor autovalor para círculos mínimos com raios maiores. Para um círculo mínimo com simetria axial e raio por volta de 55°, os três autovalores são aproximadamente iguais, e os índices k e C indicam uma distribuição esférica ou aleatória (WOODCOCK 1977).

SUMÁRIO DOS PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Os dados de entrada devem estar em graus na forma CLAR ou européia (Cazimute do rumo da linha de máximo mergulho de um plano e ângulo de mergulho).

Para a plotagem de lineação no diagrama Schmidt-Lambert, considerou-se a distância do centro do diagrama até a projeção da lineação como (HOBBS et al. 1976):

$$D = \sqrt{2} \cdot R \cdot \sin(\pi/4 - \phi/2) \quad \text{onde: } R = \text{raio do círculo}$$
$$\phi = \text{caimento de lineação}$$

A distância do centro do círculo até a projeção do polo de um plano foi considerado como (HOBBS et al., op. cit.):

$$D = \sqrt{2} \cdot R \cdot \sin(\phi/2) \quad \text{onde } R = \text{raio do círculo}$$
$$\phi = \text{mergulho do plano}$$

Para o traçado de projeções ciclográficas, utilizou-se da função que define o mergulho aparente de um plano (RAGAN 1973) entre a direção do plano e a direção do mergulho aparente, conforme já utilizado por YAMAMOTO & PEREIRA JR. (1984):

$$\tan \alpha = \tan \delta \cdot \sin \beta$$

onde α = mergulho aparente;

δ = mergulho real;

β = ângulo entre a direção do plano
e a direção do mergulho aparente.

Traçou-se então a projeção ciclográfica unindo-se as linhas sucessivas contidas no plano, desde o mergulho zero até o máximo valor de mergulho (mergulho real). A distância do centro do círculo até o ponto de máximo mergulho da projeção ciclográfica é dada por (HOBBS et al., op.cit.):

$$D = \sqrt{2} \cdot R \cdot \sin(\pi/4 - \phi/2) \quad \text{onde } R = \text{raio do círculo}$$
$$\phi = \text{ângulo de mergulho do plano}$$

Para a determinação dos parâmetros estatísticos foi estabelecido um sistema triortogonal de referência baseado nas coordenadas geográficas e na linha vertical, e os dados de orientação de planos na forma CLAR (Cazimute do rumo do mergulho/ângulo de mergulho) foram transformados nos cossenos diretores (l, m, n) dos polos dos planos, considerados como vetores unitários, calculados conforme a seguir:

$$l = \cos(\text{rumo}) \cdot \sin(\text{mergulho})$$

$$m = \sin(\text{rúmo}) \cdot \sin(\text{mergulho})$$

$$n = \cos(\text{mergulho})$$

A matriz orientação foi então montada por somatórias dos cossenos diretores de todos os dados, conforme indicado no item anterior, e cada elemento dividido pelo número N de dados. Os autovalores foram deduzidos pela resolução da seguinte equação de terceiro grau, adaptando-se o procedimento adotado por RAMSAY (1967):

$$\lambda^3 - I_1\lambda^2 + I_2\lambda - I_3 = 0$$

onde:

$$I_1 = (\Sigma l^2 + \Sigma m^2 + \Sigma n^2) = 1$$

$$I_2 = \{\Sigma l^2 \cdot \Sigma m^2 + \Sigma m^2 \cdot \Sigma n^2 + \Sigma n^2 \cdot \Sigma l^2 - (\Sigma l m)^2 - (\Sigma m n)^2 - (\Sigma l n)^2\}$$

$$I_3 = \{\Sigma l^2 \cdot \Sigma m^2 \cdot \Sigma n^2 + 2\Sigma l m \cdot \Sigma m n \cdot \Sigma l n - \Sigma l^2 \cdot (\Sigma m n)^2 - \Sigma m^2 \cdot (\Sigma l n)^2 - \Sigma n^2 \cdot (\Sigma l m)^2\}$$

Para a resolução da equação cúbica utilizou-se o método de Cardano.

Os cossenos diretores (l_i , m_i , n_i) dos três autovetores associados respectivamente as autovalores λ_1 , λ_2 e λ_3 foram calculados da seguinte forma (RAMSAY, 1967):

$$n_i = \frac{c_i}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2 + c_i^2}} \quad l_i = n_i \frac{a_i}{c_i} \quad m_i = l_i \frac{b_i}{a_i}$$

$$\text{onde: } a_i = \Sigma m^2 \Sigma n^2 - \Sigma m^2 \lambda_i - \lambda_i \Sigma n^2 + \lambda_i^2 - (\Sigma m n)^2$$

$$b_i = \lambda_i \Sigma l m + \Sigma l n \cdot \Sigma m n - \Sigma l m \cdot \Sigma n^2$$

$$c_i = \lambda_i \Sigma l n + \Sigma l m \cdot \Sigma m n - \Sigma l n \cdot \Sigma m^2$$

Os sinais dos valores dos cossenos diretores de cada autovetor são testados para se saber a que quadrante pertencem, transformados na forma CLAR e plotados no diagrama.

Os índices de forma e dispersão da distribuição de polos de planos são calculados conforme os índices normalizados propostos no item anterior:

$$F = \frac{2 \cdot \ln(S_2) - \ln(S_1) - \ln(S_3)}{\ln(S_1) - \ln(S_3)} \quad D = \frac{\ln(S_1^2/S_3^2)}{\ln(S_1^2/S_3^2) + 2}$$

APLICAÇÕES PRÁTICAS

As aplicações até agora feitas no programa demonstraram que este se constitui numa ferramenta prática e flexível para a análise de grandes volumes de dados estruturais. A maior parte do tempo de trabalho é tomado na digitação inicial dos dados. Embora tenha sido concebido inicialmente para a delimitação e análise de domínios estruturais em áreas dobradas, a configuração alcançada é bastante flexível, e permite diversas outras utilizações, a critério do usuário. Os métodos estatísticos desenvolvidos mostraram-se bastante úteis, no sentido de fornecerem sempre o melhor ajuste estatístico aos dados apresentados, independentemente de interpolações subjetivas, e mesmo com distribuições com alta dispersão. Permite também uma comparação mais objetiva e isenta entre amostras distintas de dados.

É particularmente útil no tratamento preliminar de dados, quando se busca um reconhecimento de domínios homogêneos num grande volume de dados. A rapidez com que o computador permite o agrupamento e reagrupamento de dados, torna possível uma nova abordagem deste tema. A delimitação dos domínios pode ser feita por tentativa e erro, agrupando-se sucessivamente os dados de pontos vizinhos, enquanto haja uma orientação preferencial significativa, e voltando-se atrás sobre os próprios passos quando a dispersão ultrapassa valores críticos.

REFERÉNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, T.W. & STEPHENS, M.A. 1972. Tests for randomness of directions against equatorial and bimodal alternatives. *Biometrika*, 59(3): 613-621.
- CAMPANHA, G.A da C. & YAMAMOTO, J.K. 1987. *Programas para geologia estrutural em linguagem BASIC para microcomputadores tipo "Apple".* São Paulo, IPT. 65p. (IPT. Relatório, N° 25 015) (inédito).
- CHEENEY, R.F. 1983. *Statistical methods in geology* George Allen & Unwin Ltd., London.
- CRUDEN, D.M. & CHARLESWORTH, H.A.K. 1972. Observations on the numerical determination of axes of cylindrical and conical folds. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 83: 2019-2024.
- HARVEY, P.K. & FERGUSON, C.C. 1978. A computer simulation approach to textural interpretation in crystalline rocks. In: MERRIAM, D.F. 1978, *Recent advances in geomathematics*, Pergamon, Oxford. p. 201-232.
- HOBBS, B.E.; MEANS, W.D.; WILLIAMS, P.F. 1976. *An outline of structural geology*. John Wiley & Sons, Inc., 571p.
- HSU, T.C. 1968. The characteristics of coaxial and non-coaxial strain paths. *Journal of Strain Analysis*, 1(3): 216-222.
- KIRALY, L. 1969. Statistical analysis of fractures (orientation and density). *Geol. Rundschau*, 59(1): 125-151.
- MARDIA, K.V. 1972. *Statistics of directional data*. Academic Press, London.
- NYE, J.F. 1957. *Physical properties of crystals: their representation by tensors and matrices*. Oxford Univ. Press, 322p.
- RAGAN, D.M. 1973. *Structural geology: an introduction to geometrical techniques*. John Wiley & Sons, 2- ed., 208p.
- RAMSAY, J.G. 1967. *Folding and fracturing of rocks*. McGraw Hill, New York, 568p.
- SCHEIDEGGER, A.E. 1965. On the statistics of the orientation of bedding planes, grain axes, and similar sedimentological data. *U.S. Geol. Survey Prof. Paper*, 525-C: 164-167.
- WATSON, G.S. 1965. Equatorial distributions on a sphere. *Biometrika*, 52: 193-201.
- WOODCOCK, N.H. 1977. Specification of fabric shapes using an eigenvalue method. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 88: 1231-1236.
- WOODCOCK, N.H. & NAYLOR, M.A. 1983. Randomness testing in three dimensional orientation data. *Journal Struct. Geol.*, 5(5): 539-548.
- YAMAMOTO, J.K. & PEREIRA JR., G.G. 1984. Tratamento automático de dados estruturais. In: CONGR. BRAS. GEOL., 33, Rio de Janeiro, 1984 Anais... Rio de Janeiro, SBG. v.12, p. 5283-5293.

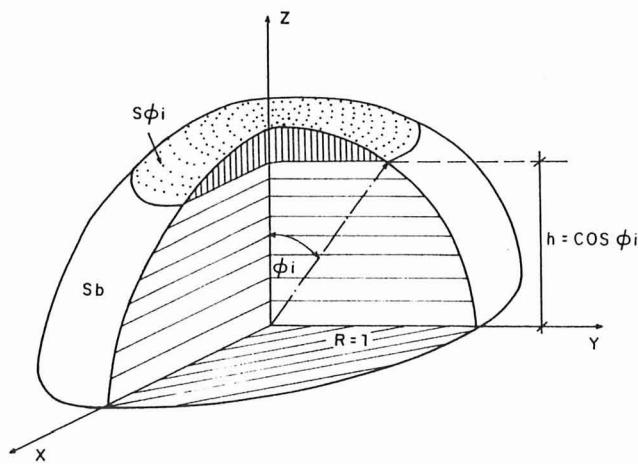


Figura 1-Desvio angulares (em ângulos sólidos $S\phi_i$ e Sb) de um vetor unitário \vec{v}_i com relação a um eixo Z, e um plano XY (adaptado de Kiraly 1969).

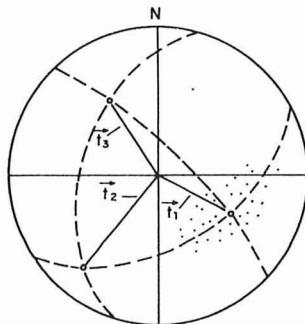


Figura 2-Relações entre uma distribuição de pólos e os autovetores. O autovetor t_1 (associado ao maior autovalor) corresponde à concentração média da distribuição, enquanto o autovetor t_3 (associado ao menor autovalor) corresponde ao polo do plano de melhor ajuste (ao eixo π , no caso da análise de dobramentos cilíndricos). O autovetor t_2 (associado ao autovalor intermediário) é perpendicular aos outros dois (adaptado de Kiraly 1969).

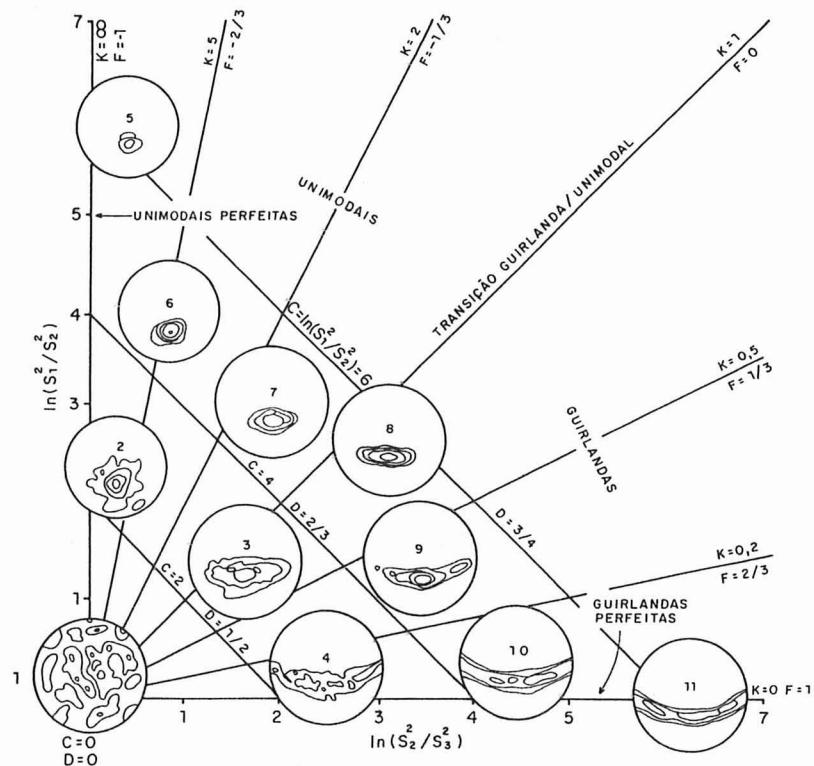


Figura 3 - Diagrama bilogarítmico das razões dos autovalores normalizados S_1, S_2, S_3 com exemplos de distribuições de dados orientados em partes diferentes do gráfico (adaptado de Woodcock, 1977).

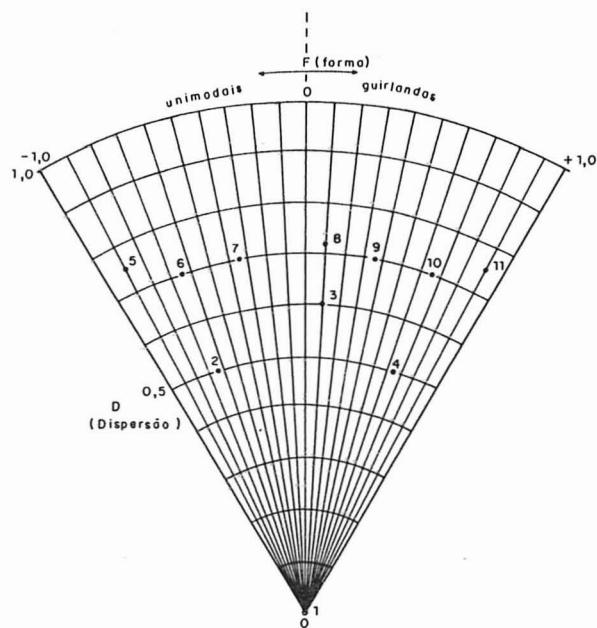


Figura 4 - Diagrama de HSU adaptado para os índices aqui propostos de forma e dispersão. Os pontos numerados mostram aproximadamente as posições das mesmas distribuições da figura 3.

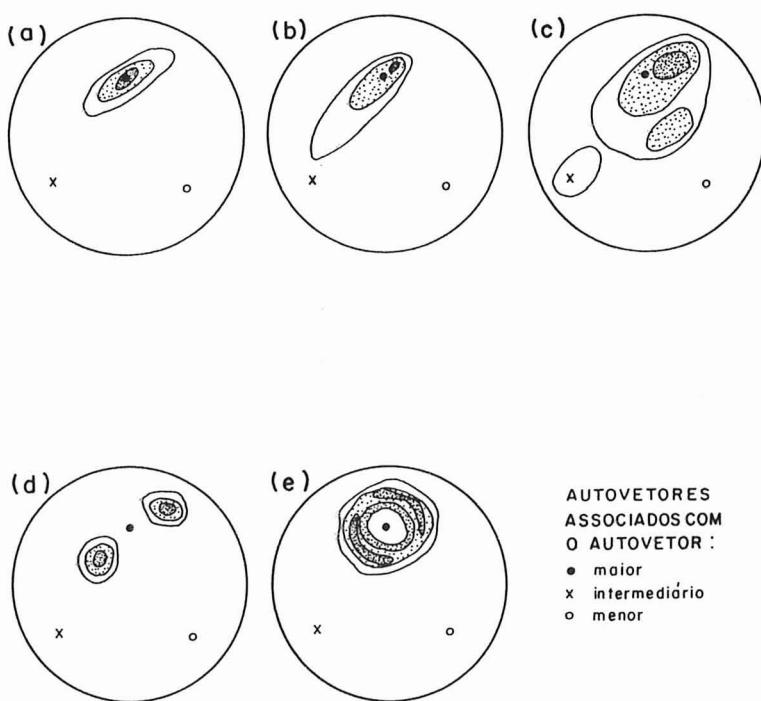
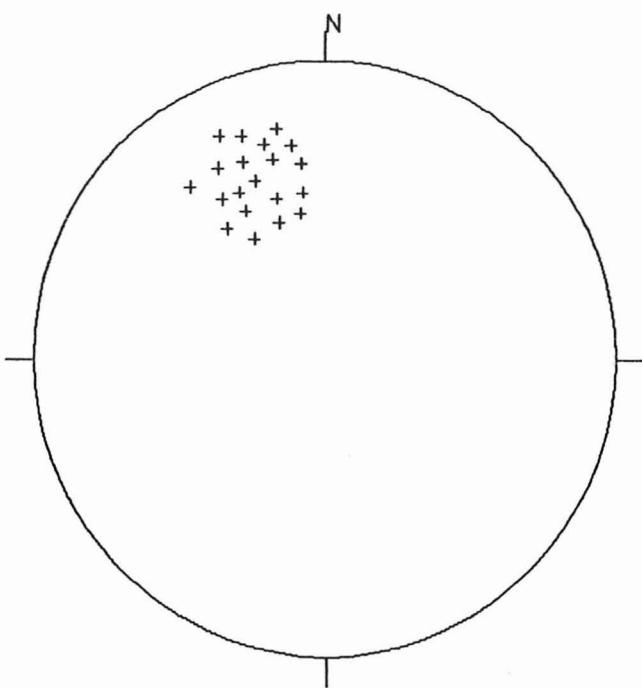
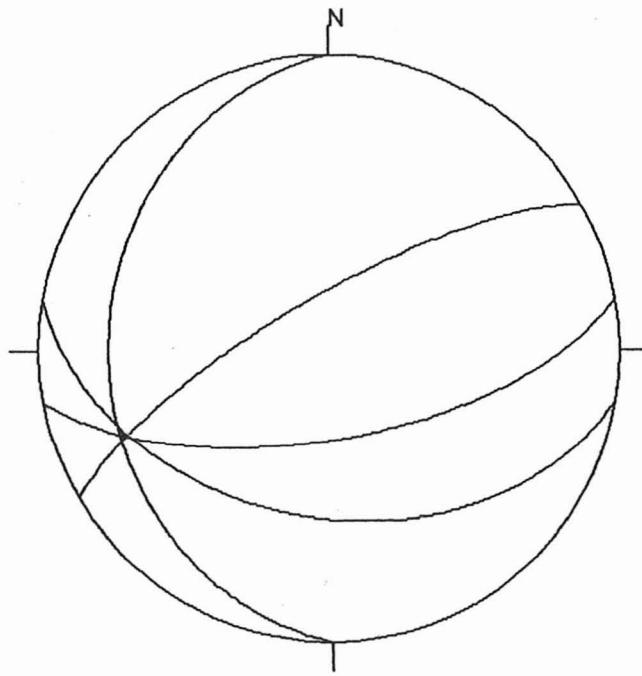


Figura 5 - Projeções de igual-área para distribuições idealizadas de tramas com simetria ortorrômbica (a,d,e), monoclinica (b) e triclinica(c), mostrando a atitude dos autovetores associados (adaptado de Woodcock,1977).

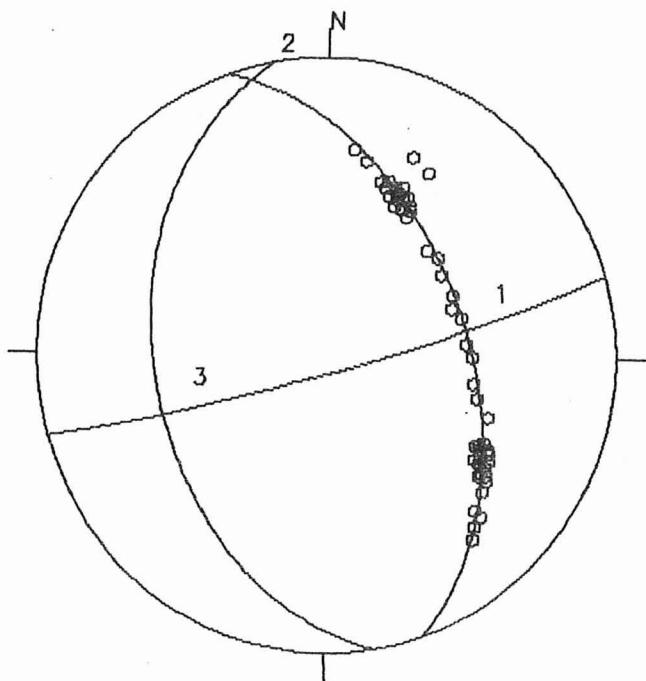


Lineaçoes N=20 dados



Projeções ciclográficas N=4 dados

Figura 6 - Exemplos de projeções ciclográficas e plotagem de lineações efetuadas pelas rotinas gráficas do programa



Acamamentos N=50 dados

PARÂMETROS ESTATÍSTICOS

Número de dados = 50

FORMA (+1 = guirlanda -1 = unimodal)
 $F = 7.5173777029E-01$

DISPERSÃO (0 = aleatoria 1 = nula)
 $D = 7.4729273440E-01$

AUTOVALORES
 $V1 = 6.7448408010E-01$ $V2 = 3.2369443423E-01$
 $V3 = 1.8214856764E-03$

AUTOVETORES (A1 = vetor médio A3 = eixo pi)
 $A1 = 80/50$ $A2 = 344/5$ $A3 = 250/40$

Figura 7 - Exemplos de diagrama e parâmetros estatísticos calculados pelo programa. A intersecção 1 no diagrama (autovetor 1) corresponde ao vetor médio da distribuição e a intersecção 3 (autovetor 3) ao eixo π . São listados os seguintes parâmetros estatísticos: número de dados (N), forma de distribuição (F), dispersão (D) e os três autovalores e os três autovetores (forma CLAR).