

Campanha, G.A.

0920953

PROJEÇÃO ESTEREOGRÁFICA PARA ANÁLISE DE ESTRUTURAS

**Programas ESTER e TRADE. Fundamentos Teóricos,
Exercícios e Aplicações em Microcomputador,
Laboratório e Campo**

São Paulo, 1996

Celso Dal Ré Carneiro
(Coordenador)

UNICAMP

CPRM

IPT

© 1996, Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. • IPT
Cidade Universitária Armando de Salles Oliveira • Butantã

CEP 05504-91 São Paulo-SP • Caixa Postal 717 • CEP 05504-91
Telefax (011) 869-3353 • Telefone (011) 268-2211

Impresso no Brasil.

ISBN 85-85369-04-3

Diretoria Executiva IPT

Diretor-Superintendente: Milton de Abreu Campanario

Diretor Administrativo-Financeiro: Dilson Funaro Júnior

Diretor Técnico: Marco Giulietti

Diretor de Planejamento e Gestão: Álvaro Rodrigues dos Santos

Instituto de Geociências UNICAMP

Diretor: Celso Pinto Ferraz

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

Presidente: Carlos Oiti Berbert

Diretor de Hidrologia e Gestão Territorial: Idelmar da Cunha Barbosa

Diretor de Geologia e Recursos Minerais: Antonio Juarez Milmann Martins

Diretor de Administração e Finanças: Augusto Wagner Padilha Martins

Diretor de Relações Institucionais e Desenvolvimento: Gil Pereira de Souza Azevedo

Gerente da Divisão de Marketing e Divulgação: Ernesto Von Sperling

Colaboradores

Joaquim Raul Torquato, Yociteru Hasui, Luís Humberto Pedreira, Naohiko Nagata, Shintaro Furumoto, Ginaldo A.C. Campanha, Genis Garcia A. Pereira, Jorge Kazuo Yamamoto, José Antonio S. Albino, Mário Otávio Costa, Nivaldo Paulon, Carlos César Tanaka, José Alberto Quintanilha.

Edição

Assessoria de Comunicação Social - Publicações

Assessor: Rubens Santo Marini. *Editoração:* Ana Cristina Teixeira. *Editoração Eletrônica:* Laura Rumi Yamamura

Capa

Criação: Almir Ferreira

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Projeção estereográfica para análise de estruturas : programas ESTER e TRADE.
fundamentos teóricos, exercícios e aplicações em microcomputador, laboratório e
campo / Celso Dal Ré Carneiro (coordenador). - São Paulo : Instituto de
Pesquisas Tecnológicas ; Campinas, SP : Instituto de Geociências, Universidade
Estadual de Campinas ; Rio de Janeiro : CPRM, 1996. - (Publicação IPT 2377)

Vários autores.

Vários colaboradores.

Bibliografia.

ISBN 85-85369-04-3

1. Geologia estrutural 2. ESTER (Programa de computador) 3. TRADE
(Programa de computador) I. Carneiro, Celso Dal Ré. 1951- II. Título.

95-1777

CDD-551.8

Índices para catálogo sistemático:

1. Análise de estruturas : projeção estereográfica : Geologia estrutural 551.8

Publicação IPT 2377

Tiragem: 600 exemplares

USO DO PROGRAMA TRADE PARA DETERMINAÇÃO DE DIREÇÕES PRINCIPAIS DE ESFORÇOS PELOS MÉTODOS ARTHAUD E ANGELIER

Ginaldo A.C. Campanha, Celso Dal Ré Carneiro, Genis Garcia Pereira Júnior,
Shintaro Furumoto, Yociteru Hasui e Naohiko Nagata



1 INTRODUÇÃO

O tratamento estatístico manual de dados de populações de falhas, cujos elementos básicos foram descritos no Capítulo anterior, dispense um tempo considerável, pois o número de operações envolvidas é realmente grande, ainda que bastante repetitivo. O lançamento computacional dessas estruturas reduz, enormemente, esse tempo. O programa aqui apresentado manteve o nome original - TRADE - que significa "Tratamento de Dados Estruturais". Incorpora os métodos de Arthaud (1969) e de Angelier e Mechler (1977), também conhecidos, respectivamente, como Método Arthaud e Método dos Diedros Retos ou, simplesmente, Método Angelier.

Os programas TRADE e ESTER são similares quanto a princípios de construção, linguagem de programação e equipamento utilizado. Os autores de ambos os programas correspondem à lista de autores do Capítulo IV. TRADE não possui o mesmo padrão gráfico de ESTER, devido a limitações de tamanho. A entrada de dados é também distinta (Cap. IV), bem como a capacidade de tratar dados de falhas, pelos métodos citados. A fundamentação teórica acha-se no Capítulo VII.

A instalação é simples: basta copiar os arquivos TRADE.EXE, TRADEOPS.DAT e ANGELOPS.DAT para o *drive* e diretório desejados. Operando-se com disco rígido, é recomendável criar um subdiretório específico para abrigar, tanto os arquivos de dados, como o programa, que opera normalmente em qualquer microcomputador compatível com a linha IBM PC, com o mínimo de 500 kb de memória RAM. Pode-se até mesmo trabalhar em computadores desprovidos de disco rígido. Para a saída de dados, o programa suporta impressora matricial gráfica de 9 pinos compatível com padrão Epson, ou *plotter* padrão Houston, além de qualquer monitor de vídeo (com resolução no padrão CGA). A construção da saída, em impressora matricial, é ponto-a-ponto. A utilização de micros com mais velocidade de processamento e/ou co-processador aritmético é recomendável para conjuntos de dados muito grandes, já que micros PC-XT, sem co-processador, podem se tornar muito lentos (atingindo 30 minutos ou mais).

2 ALGORITMOS UTILIZADOS

Os algoritmos utilizados para a elaboração de diagramas Schmidt-Lambert e para a dedução de estatísticas são os mesmos descritos em ESTER (Cap. IV). Para os métodos de Arthaud e Angelier foram desenvolvidos algoritmos próprios, a partir dos já existentes para o diagrama de Schmidt-Lambert. As orientações da estria e da reta normal ao plano de falha são transformadas em seus respectivos cossenos diretores, conforme mostrado no Capítulo V:

$$\text{estria} = (l_1, m_1, n_1) \quad (\text{VIII.1})$$

$$\text{normal ao plano} = (l_2, m_2, n_2) \quad (\text{VIII.2})$$

O ângulo α , entre a estria e o plano, é calculado por meio da seguinte relação:

$$\cos(90 - \alpha) = l_1 l_2 + m_1 m_2 + n_1 n_2 \quad (\text{VIII.3})$$

Este ângulo deveria ser, idealmente, igual a zero. Em geral não o é, em função de erros de medida. O programa não processa aqueles conjuntos de dados onde $\alpha > 10^\circ$. Para o cálculo dos pólos dos planos de movimento do Método Arthaud, utiliza-se o *produto vetorial* entre a estria e o pólo do plano de falha. Sendo o vetor M , o pólo do movimento, E a estria e P o pólo do plano, tem-se a relação:

$$M = E \wedge P \quad (\text{VIII.4})$$

Os pólos de planos de movimento, assim obtidos, são plotados no diagrama e contornados, conforme o algoritmo descrito para o diagrama de Schmidt-Lambert (Cap. IV). Caso a estria não coincida exatamente com o plano de falha ($0^\circ < \alpha \leq 10^\circ$), é calculada uma estria corrigida E' , por meio de um duplo produto vetorial, como segue:

$$E' = (E \wedge P) \wedge P \quad (\text{VIII.5})$$

Para o Método Angelier, é utilizado o recurso de mudança de sistema de coordenadas. Para cada par de dados plano/estria, é definida uma nova base de coordenadas cartesianas, cujos eixos ortogonais de referência são constituídos pela direção da estria e as retas a ela normais, contidas no plano de falha e no plano auxiliar (que por sua vez é perpendicular ao plano de falha e à estria). São atribuídos, então, sentidos aos eixos e sinais para os diedros assim definidos, de acordo com o sentido do movimento da falha.

Sendo P uma matriz coluna dos cossenos diretores do vetor no sistema antigo, P' uma matriz coluna dos cossenos diretores do vetor dos eixos do sistema novo, e B uma matriz quadrada dos cossenos diretores dos eixos do novo sistema com relação ao antigo (matriz de transformação de coordenadas), a transformação das coordenadas é dada por:

$$P' = B * P \quad (\text{VIII.6})$$

Para cada nó da malha de contagem do diagrama de Schmidt-Lambert (Cap. IV), é aplicada a fórmula acima e é atribuído o valor 0 ou 1, conforme o diedro em que se encontre seja, respectivamente, trativo ou compressivo.

Passa-se, então, ao par seguinte de plano de falha/estria, e repete-se todo o procedimento. Após processados todos os dados, são desenhadas as curvas de isofrequência sobre a malha de contagem. As áreas que tiveram maior frequência corresponderão àquelas que tiveram maior número de diedros compressivos e vice-versa.

3 ENTRADA DE DADOS

A entrada de dados só pode ser feita a partir de um arquivo já existente. Não é possível gerar arquivos no momento da operação, pelo teclado. TRADE trata dados estruturais segundo o rumo azimutal do mergulho, típico das bússolas CLAR (ver Capítulo II): a atitude dos dados planares é dada pelo par azimute do rumo do mergulho/ângulo de mergulho real (Exemplo: 250/30). Analogamente, a atitude de dados lineares é indicada pelo azimute do rumo da linha / mergulho da linha. O algoritmo básico permite entrada de dados até o limite máximo de 1.000 pares. O programa não opera conjuntos de dados maiores do que esse limite. A escolha entre os métodos de Arthaud ou Angelier é feita assim que o programa é carregado (Fig. VIII.1).

```

=== TIPOS DE DIAGRAMA ===

1 = SCHMIDT-LAMBERT
2 = ARTHAUD
3 = ANGELIER
4 = FIM DO PROGRAMA

Entre com a escolha:

```

FIGURA VIII.1 - Tela inicial de TRADE.FNF

A aplicação dos métodos Arthaud e Angelier pressupõe entrada de dados em pares, ou seja, o plano de falha e a atitude da lineação associada, pertencente ao plano. No método Angelier, é preciso ainda indicar o sentido do movimento do plano de falha, ao longo da direção definida pela estria ou lineação. Convém indicar sempre esse conjunto de dados. Quando o sentido de movimento não tiver sido obtido para determinado(s) par(es) de dados, indica-se que o dado é inexistente, por meio de um símbolo diferente, conforme explicado adiante.

3.1 Arquivo de Dados

Para criar e editar dados, pode-se utilizar qualquer editor de texto, banco de dados, ou planilha, capazes de gerar arquivos-texto (ASCII) na forma indicada a seguir. Não pode constar no arquivo nenhum outro caractere "estranho", como caracteres de controle ou de formatação. Em caso de dúvida, sugere-se consultar os manuais dos programas para verificar o modo de produção de arquivos só-texto, texto ou ASCII.

Os editores de texto disponíveis no mercado, como, Word, Wordstar, WordPerfect e outros, criam arquivos no formato "só-texto" desprovidos da formatação usual de arquivos-documento. O comando EDIT do DOS (versão 5.0 ou seguintes), assim como a versão Norton Editor (NE) ou o editor do Xtree facilitam a criação de arquivos no *formato só-texto*. Bancos de dados como o Dbase e as diversas planilhas disponíveis no mercado (Lotus, Quattro, Excel etc.) também geram arquivos-texto. A escolha do tipo de programa dependerá, naturalmente, da experiência e do conhecimento do usuário, além do conjunto de dados a operar. Na elaboração de diagramas com poucos dados, o caminho mais rápido pode ser por meio de editores de texto. Entretanto, se o conjunto de dados é muito grande e complexo, ou se há intenção de reunir dados de diferentes locais em diagramas abrangentes, o uso de programas tipo banco de dados ou planilha é mais indicado. Neste caso, é viável executar diferentes combinações de locais de coleta, domínios e tipos de dados.

Os arquivos de dados podem estar no mesmo subdiretório em que estão os arquivos do sistema ou em outra unidade/subdiretório. Neste último caso, deve-se indicar o caminho (*path*) para acessar o arquivo (Exemplo: C:\Diretório\Subdiretório\Arquivo). Os arquivos de dados a serem lidos pelo programa devem possuir as seguintes características:

- arquivos-texto (ASCII), com a seguinte seqüência de dados: rumo do plano de falha, mergulho do plano de falha, rumo da estria, mergulho do plano da estria, sentido de movimento;
- dois pares de dados (rumo + mergulho) por linha, respectivamente delimitados por vírgula ou espaço;
- dados de rumo variando entre 0 e 360° e, de mergulho, entre 0 e 89°;
- indicação do sentido de movimento segundo os códigos: falha dextral (d); sinistral (s); normal (n); inversa (i) e indeterminada (x).

Exemplos:

020	80	315	60	S
020,	80	315,	60	S
300	60	030	10	D
180	79	280	03	X
(.....)		(.....)		

Para uso da opção de geração de diagramas Schmidt-Lambert, os arquivos podem ser mais simples, contendo apenas uma família de linhas ou planos, digitados em duas colunas de rumo/mergulho, como, por exemplo:

020	80
300	60
171	69
180	79
(.....)	

Ao gerar os arquivos, é preciso evitar que a última linha esteja em branco, porque uma linha "vazia" é interpretada por TRADE como dados *existentes*, mas sem consistência, porque o programa não consegue

localizá-los. Por exemplo, se a última linha da listagem do primeiro exemplo terminasse em "... 280 03 X", seria necessário manter o cursor ao lado direito da letra X, *sem digitar novo comando <RETURN>*.

Deve-se notar que ao rodar o programa, nas opções Arthaud ou Angelier, este irá realizar um teste de consistência entre a orientação do plano de falhas e da estria de atrito. Se o ângulo diedral, entre estes, for maior que 10° , o dado será desprezado.

4 CARREGANDO E OPERANDO O PROGRAMA

Com os programas copiados num subdirectório adequado, basta digitar TRADE para iniciar o processo. Para facilitar o acompanhamento das telas e opções apresentadas a seguir, recomenda-se utilizar os dados do arquivo TESTE2.TXT, apresentado no exercício de apreensão, ao final deste capítulo. Observe-se que, caso o arquivo de programa TRADE e o arquivo de dados a ser tratado não estejam na mesma área de trabalho, deverá ser assinalado o caminho (*path*) correspondente, para haver compatibilidade entre eles.

Ao ser apresentada a tela inicial de TRADE (Fig. VIII.1), existem três opções possíveis: [1] elaboração de diagramas de Schmidt-Lambert; [2] diagramas de Arthaud e [3] diagramas de Angelier. A quarta opção é para TERMINAR e retornar ao sistema operacional.

4.1 Elaborando Diagramas de Schmidt-Lambert

No caso da opção [1], o programa solicita o nome do arquivo de dados e uma série de informações adicionais (Fig. VIII.2).

TRADE permite, interativamente, as seleções do tipo de dado utilizado (linhação ou plano), forma de entrada, operação envolvida (plotagem de pólos, curvas de isofrequência e parâmetros estatísticos) e tipo de saída gráfica desejada, tal como o módulo DIAGRAMA de ESTER. O periférico de saída só é escolhido após executado o diagrama (visualizado na tela), podendo ser entre impressora matricial e traçador gráfico (*plotter*).

4.2 Aplicação dos Métodos Arthaud e Angelier

Na segunda tela do programa (Fig. VIII.2), além do nome do arquivo, fornecem-se nome e informações complementares sobre a unidade litológica.

Caso tenham sido escolhidas, na primeira tela, as opções [2] ou [3], o programa já passa para o processamento. A primeira etapa é a realização de um teste de consistência dos dados (Fig. VIII.3). O programa avalia se existe coerência entre a atitude do plano de falha e da estria de atrito. Uma

```
***** ENTRADA DE DADOS *****

NOME DO ARQUIVO = c:\xcs\teste2.txt

LOCAL: Ribeira

UNIDADE LITOLÓGICA: Filitos

(12 caracteres, no máximo...)
```

FIGURA VIII.2 - Indicação do arquivo de dados e características do local analisado

```
LEITURA DOS DADOS E CALCULO DO PLANO DE MOVIMENTO

VALOR LIDO: 216      78      216      78
PLANO MOV. 126      90
LIN. INTERS. 216      78 => OK 0.0      S
VALOR LIDO: 28      80      294      28
PLANO MOV. 272      30
LIN. INTERS. 295      28 => OK 1.2      S
VALOR LIDO: 178      88      254      46
PLANO MOV. 270      47
LIN. INTERS. 266      46 => OK 8.2      S
VALOR LIDO: 28      80      315      60
PLANO MOV. 285      64
LIN. INTERS. 309      61 => OK 3.3      S
VALOR LIDO: 190      89      282      30
PLANO MOV. 282      30
LIN. INTERS. 279      31 => OK 2.5      S
VALOR LIDO: 4      85      10      40
PLANO MOV. 95      84
LIN. INTERS. 56      82 => # > 10.0: 44.7
VALOR LIDO: 235      89      336      15
PLANO MOV. 329      15
LIN. INTERS. 325      17 => # > 10.0: 11.0
APORTE QUALQUER TECLA...
```

FIGURA VIII.3 - Apresentação, na tela, dos resultados do teste de consistência de dados



FIGURA VIII.4 - Tela apresentada pelo programa durante o processamento

Quando é escolhida a opção [1], TRADE aciona a quarta tela do programa, que pergunta ao usuário o tipo de dados (as alternativas são: Lineação ou Plano). Pode-se obter (1) plotagens de pólos de planos ou lineações, (2) contagem e traçado das curvas de isofrequência, ou (3) cálculo dos eixos principais segundo o método Arthaud e (4) cálculo dos eixos principais, segundo Angelier. Também se pode optar pela forma de saída gráfica desejada (tela, *plotter* ou impressora).

Em seguida, o programa deve iniciar o desenho do diagrama na tela, impressora ou *plotter*, dependendo da escolha. Os resultados obtidos em impressora matricial RIMA XT180, Epson LX-810 ou similares são semelhantes aos apresentados no Capítulo IV.

5 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

No método Arthaud, TRADE apresenta um diagrama contendo os pólos de planos de movimento e as linhas de contorno de isofrequência. É aplicado, também, o método do tensor orientação, descrito no Capítulo V, fornecendo, sobre a nuvem de pólos obtida, três planos de simetria e três eixos ortogonais entre si. Estes eixos *não correspondem* obrigatoriamente aos eixos de deformação ou esforços corretos. Para a devida interpretação, recomenda-se fortemente a utilização do trabalho de Aleksandrowski (1985), que reelabora conceitos definidos originalmente por Arthaud (1969). É sempre bom lembrar que o método Arthaud, por si, não indica quais, dentre os eixos obtidos, correspondem aos de máxima compressão ou tração, cabendo tal interpretação ao usuário, em função de seus dados geológicos ou premissas.

```
NUMERO DE DADOS = 49      ( onde 01 dado = 2.04%)
FREQUENCIAS  MAXIMA = 18.4% e MINIMA = 0.0%
NUMERO ( maximo = 6 ) DE ISOLINHAS: 3   escolha o valor: 5
ENTRE COM O VALOR DE PORCENTAGEM PARA CADA CURVA
CURVA 1 = 0.00  valor escolhido(%) =
CURVA 2 = 4.20  valor escolhido(%) =
CURVA 3 = 8.40  valor escolhido(%) =
CURVA 4 = 12.60 valor escolhido(%) =
CURVA 5 = 16.80 valor escolhido(%) = █
```

FIGURA VIII.5 - Seleção dos intervalos de curvas de isofrequência

listagem deverá aparecer na tela, sob o título "Leitura dos dados e cálculo do plano de movimento" com destaque para aqueles inconsistentes.

Ângulos diedrais maiores que 10° entre a estria, ou lineação, com o plano de falha são apontados em cor branca e com maior brilho de caracteres, sobre tela escura. Valores superiores a 10° são desprezados. Se o usuário desejar, poderá sair do programa e utilizar editor de textos para corrigir seus dados.

Se os dados forem aceitáveis, pode-se prosseguir, selecionando-se a opção EXECUTAR para elaboração do diagrama. Dados inconsistentes não serão processados. As telas apresentadas na sequência final são idênticas às das Figuras IV.12 e IV.13.

No método Angelier, TRADE apresenta um diagrama com curvas de isofrequência variando inicialmente de 0% a 100%. As áreas delimitadas pela menor frequência terão maior probabilidade de conter o esforço máximo trativo (σ_3 , dependendo da convenção utilizada), enquanto as áreas de maior frequência terão maior probabilidade de conter o esforço

máximo compressivo (σ_1 , de acordo com a convenção). O usuário pode, tentativamente, modificar o número de curvas de isofrequência e seu valor, até obter uma configuração mais nítida.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Embora TRADE constitua versão mais antiga que ESTER, sua manipulação é bastante fácil para a maioria dos usuários e substitui, com vantagens, os demorados procedimentos manuais exigidos pelos métodos de Arthaud e Angelier. O tempo de processamento não é elevado e o desempenho pode melhorar com o uso de co-processador aritmético.

EXERCÍCIOS DE APREENSÃO. PROGRAMA TRADE

EXERCÍCIO 1 - REGIMES DE DEFORMAÇÃO - MÉTODOS DE ARTHAUD E ANGELIER & MECHLER

No disquete do programa TRADE, verifique a existência do arquivo TESTE3.TXT, que contém um conjunto de 61 dados de falhas e respectivas estrias de atrito, escritos na notação CLAR. Correspondem às mesmas falhas, estrias de atrito e movimentos relativos à Tabela VII.7 do primeiro exercício de apreensão do Capítulo VII. Utilizando TRADE, procure obter as informações e conclusões solicitadas no exercício:

- 1) Deduzir a cinemática de geração dessas falhas (eixos de deformação XYZ e regime tectônico: compressivo, transcorrente ou distensivo)
 - a) plotar os planos de falha e as estrias;
 - b) interpretar esses estereogramas;
 - c) plotar os planos de movimento e deduzir os eixos de XYZ pelo método Arthaud;
 - d) deduzir o tensor de tensão e discutir o regime tectônico.
- 2) Deduzir a dinâmica de geração dessas falhas (eixos σ_1 , σ_2 e σ_3 e regime coaxial / não-coaxial, neste caso, a orientação possível do binário)
 - a) plotar os diedros retos de cada falha com movimento relativo conhecido e deduzir os campos compressivos e distensivo);
 - b) determinar σ_1/σ_3 e deduzir σ_2 ;
 - c) analisar o tipo de regime tectônico.

Resultados dos Exercícios do Capítulo VIII

1. Os dados do exercício do Capítulo VII são idênticos a estes, de tal sorte que os resultados devem ser similares. Com efeito, aplicando-se o método Arthaud, os autovetores fornecidos por TRADE são os seguintes: $\tau_1 = 106/73$, que corresponde a Y; $\tau_2 = 284/17$, que corresponde a Z e $\tau_3 = 14/01$, que corresponde a X. Os coeficientes de forma e dispersão da guirlanda obtida são, respectivamente, 0,24 e 0,52.

SUMÁRIO DO CAPÍTULO VIII

O programa TRADE, descrito no Capítulo VIII, realiza as mesmas operações que ESTER e possibilita realizar, adicionalmente, análises de áreas falhadas, por meio dos métodos Arthaud e Angelier. Observamos que a rapidez de processamento e facilidade de uso são vantajosas, em relação às técnicas manuais de plotagem, contorno e processamento, mas o programa ainda é dependente de outros aplicativos para criação e gerenciamento de arquivos de dados.