

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO
DA ESTRUTURA DO PAU D'ALHO
(PIRACICABA, S. P.)

PAULO ROBERTO MOURA CASTRO

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DA ESTRUTURA
DO

PAU D'ALHO (PIRACICABA, S.P.)

PAULO ROBERTO MOURA CASTRO
Geólogo pela U.S.P. Professor
Assistente do Departamento de
Engenharia de Transportes da
Faculdade de Engenharia de
Limeira, UNICAMP.

Tese apresentada à Faculdade de
Engenharia de Limeira, UNICAMP,
para a obtenção do título de
Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Mil
ton Barbosa Landim.

- 1973 -

UNICAMP
Faculdade de Engenharia de Limeira
BIBLIOTECA

T. 316
C279c

8746 BAE

~~FEL/8996~~

Bit id 345620

DEDICO:

Aos meus pais

À minha esposa

Aos meus filhos

ÍNDICE GERAL

	pag.
<u>INTRODUÇÃO</u>	I
2. <u>TRABALHOS ANTERIORES</u>	1
3. <u>GEOMORFOLOGIA</u>	4
4. <u>GEOLOGIA GERAL</u>	9
4.1 - FOTINTERPRETAÇÃO	9
4.1.1. TIPO DE COBERTURA FOTOGRÁFICA	9
4.1.2. FOTINTERPRETAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE CAMPO ...	9
4.1.3. CRITÉRIOS FOTINTERPRETATIVOS	10
4.2 - ESTRATIGRAFIA	13
4.2.1. FORMAÇÃO ITARARÉ (GRUPO TUBARÃO)	13
4.2.2. FORMAÇÃO TATUI (GRUPO TUBARÃO)	14
4.2.3. FORMAÇÃO IRATI (GRUPO PASSA DOIS)	14
4.2.4. FORMAÇÃO ESTRADA NOVA (GRUPO PASSA DOIS) ...	15
4.2.5. FORMAÇÃO PIRAMBÓIA (GRUPO SÃO BENTO)	16
4.2.6. FORMAÇÃO BOTUCATU (GRUPO SÃO BENTO)	17
4.2.7. FORMAÇÃO SERRA GERAL (GRUPO SÃO BENTO)	18
4.2.8. INTRUSIVAS BÁSICAS	19
4.2.9. FORMAÇÃO BAURU	19
5. <u>GEOLOGIA ESTRUTURAL</u>	21
5.1 - PERFIS GEOLÓGICOS	21
5.1.1. METODOLOGIA	21
5.1.2. RESULTADOS	23
5.2 - LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO DE FRATURAS	34
5.2.1. INTRODUÇÃO	34
5.2.2. METODOLOGIA	41

5.2.2.1. MÉTODO DA DUPLICAÇÃO DOS AZIMUTES..	44
5.2.2.2. MÉTODO DA RESULTANTE ÚNICA	47
5.2.2.3. MÉTODO DAS RESULTANTES PARCIAIS ...	49
5.2.2.4. MÉTODO DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA VE-	
TORIAL	53
6. <u>GÊNESE DA ESTRUTURA</u>	76
7. <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u>	81
8. <u>BIBLIOGRAFIA</u>	84

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

<i>Figura</i>		<i>Página</i>
1	Localização da área mapeada	II
2	Perfil geológico A-B (Anhembí-Piracicaba)	24
3	Perfil geológico C-D (Capela Santa Cruz - Chã cara Três Marias)	25
4	Perfil geológico E-F (Serra de São Pedro- Pau D'Alho)	26
5	Perfil geológico G-H (Pederneiras - Jardim São Jorge)	27
6	Cálculo da resultante de uma distribuição <u>se</u> mi-circular de fraturas	38
7	Localização das fraturas na área da Estrutura do Pau D'Alho	42
8	Grade de celas unitárias para o estudo de fra turas.	43
9	Mapa dos azimutes médios. Método dos azimutes duplicados	46
10	Mapa dos azimutes médios. Método da <u>resultan</u> te única.	48
11	Obtenção de θ_m pelo método das resultantes parciais	50
12	Variação da dispersão no cálculo do azimute médio. Método das resultantes parciais.	51
13	Mapa dos azimutes médios. Método das <u>resultan</u> tes parciais	52

14	Traçado de uma reta pelo método dos mínimos quadrados	57
15	Traçado de um plano pelo método dos mínimos quadrados	57
16	Gráfico de tendência de 1º, 2º e 3º graus para retas, superfícies e hipersuperfícies	59
17	Mapa dos azimutes médios. Método da análise de tendência	61
18a	Mapa de tendência dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas	64
18b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas	64
18c	Mapa residual dos azimutes direcionais médios de cada cela menos o azimute médio total	65
19a	Mapa de tendência linear dos azimutes direcionais	65
19b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais. Superfície de tendência linear	66
19c	Mapa residual dos azimutes direcionais. Superfície de tendência linear	66
20a	Mapa de tendência quadrática dos azimutes direcionais	67
20b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais Superfície de tendência quadrática	67
20c	Mapa residual dos azimutes direcionais Superfície de tendência quadrática	68
21a	Mapa de tendência cúbica dos azimutes direcionais	68

14	Traçado de uma reta pelo método dos mínimos quadrados	57
15	Traçado de um plano pelo método dos mínimos quadrados	57
16	Gráfico de tendência de 1º, 2º e 3º graus para retas, superfícies e hipersuperfícies	59
17	Mapa dos azimutes médios. Método da análise de tendência	61
18a	Mapa de tendência dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas	64
18b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas	64
18c	Mapa residual dos azimutes direcionais médios de cada cela menos o azimuth médio total	65
19a	Mapa de tendência linear dos azimutes direcionais	65
19b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais. Superfície de tendência linear	66
19c	Mapa residual dos azimutes direcionais. Superfície de tendência linear	66
20a	Mapa de tendência quadrática dos azimutes direcionais	67
20b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais Superfície de tendência quadrática	67
20c	Mapa residual dos azimutes direcionais Superfície de tendência quadrática	68
21a	Mapa de tendência cúbica dos azimutes direcionais	68

21b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais	69
	Superfície de tendência cúbica	
21c	Mapa residual dos azimutes direcionais.	69
	Superfície de tendência cúbica	
22a	Mapa de tendência quártica dos azimutes direcionais	70
22b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais	70
	Superfície de tendência quártica	
22c	Mapa residual dos azimutes direcionais	71
	Superfície de tendência quártica	
23a	Mapa de tendência quártica dos azimutes direcionais	71
23b	Mapa dos vetores dos azimutes direcionais	72
	Superfície de tendência quártica	
23c	Mapa residual dos azimutes direcionais	72
	Superfície de tendência quártica	
24	Efeito das estruturas positivas e negativas sobre o padrão regional de fraturas	74
25	Tendência do azimuth médio sobre estruturas simuladas	74

ÍNDICE DE FOTOS

<i>Foto</i>		<i>página</i>
1	<i>Vista aérea parcial da área da Estrutura do Pau D'Alho</i>	24
2	<i>Morro do Corcovado, constituído por um <u>di</u>que de diabásio</i>	30
3	<i>Vista oeste da Serra do Pau D'Alho</i>	30
4	<i>Afloramento da Formação Estrada Nova metamorfizado por contato com o diabásio do Morro do Corcovado. Km 54,5 do perfil A-B, fig. 2.</i>	31
5	<i>Detalhe do afloramento anterior</i>	31
6	<i>Afloramento da Formação Pirambóia, notando-se estratificação cruzada e marcas de onda</i>	33
7	<i>Formação Pirambóia, salientando-se um <u>dias</u>tema. Km 20,5 do perfil C-D, fig. 3</i>	33
8	<i>Vista geral do afloramento de uma brecha Km 81,5 do perfil A-B, fig. 2</i>	35
9	<i>Detalhe da brecha acima descrita</i>	35
10	<i>Vista leste das estruturas da área do Pau D'Alho</i>	77
11	<i>Vista geral este da Estrutura do Pau D'Alho, salientando-se os basculamentos e o capeamento de diabásio sobre a Formação Pirambóia.</i>	79

INTRODUÇÃO

Desde Washburne (1930), a chamada Estrutura do Pau D'Alho vem sendo estudada por diversos autores devido a possibilidade da sua ocorrência estar ligada a armadilhas (trapps) que interessariam à pesquisa do petróleo. Durante esses anos todos, porém, dúvidas existiram e existem quanto a sua classificação e origem.

Tendo isso em mente, ao realizarmos essa pesquisa, nosso objetivo primordial foi, com o auxílio da interpretação geológica e da geotectônica, conhecer os mecanismos responsáveis pela formação da Estrutura do Pau D'Alho, o tipo de estrutura presente e as relações provavelmente existentes entre ela e outras estruturas semelhantes ocorrentes no Estado de São Paulo.

A região estudada situa-se na porção centro-leste do Estado de São Paulo, limitada pelos paralelos $22^{\circ}30'00''$ e $22^{\circ}55'00''$ Sul e meridianos $47^{\circ}35'00''$ e $48^{\circ}00'00''$ oeste, ocupando uma área aproximada de 2.000 Km^2 . (fig. 1)

Foram realizados perfis geológicos, dispostos estrategicamente em relação à Estrutura, que foi evidenciada e mapeada através o levantamento fotogeológico com subsequente controle de campo e que mostram a estratigrafia e as perturbações tectônicas que ocorrem na área.

Simultaneamente, foi efetuado um levantamento de fraturas observáveis nas fotografias aéreas com o objetivo de, aplicando-se métodos de análise estatística, verificar os resultados obtidos diretamente no campo por meio dos perfis



LOCALIZAÇÃO DA ÁREA MAPEADA

FIG. 1

geológicos. Além disso, procuramos constatar as interações entre a estrutura propriamente dita e as rochas circunvizinhas, pelo estudo das modificações ocorridas nos padrões normais de fraturamento que ocorrem na crosta terrestre em regiões cobertas por rochas sedimentares. Entre os métodos utilizados os melhores resultados foram os apresentados pela análise de tendência vetorial. Essa análise, sendo basicamente um processo através o qual podemos detectar anomalias dentro de uma tendência espacial de comportamento normal de um elemento geológico qualquer, de natureza direcional, revelou-se de suma importância para nossos propósitos.

Os resultados apresentados revelaram ser a área um alto estrutural, devido a maneira de distribuição anômala das fraturas, resultante das perturbações presentes, tendo sido também comprovado pelos perfis geológicos realizados.

Ligados que somos a um centro de Engenharia, consideramos que uma das finalidades principais desse trabalho é apontar possibilidades de aplicação de um método de análise geotectônica, isto é, o da análise de tendência vetorial das direções de fraturas, que permita um melhor conhecimento das condições tectônicas de uma área para a implantação segura de obras de engenharia de grande porte.

AGRADECIMENTOS

Desejamos expressar aqui nossa imensa gratidão às seguintes pessoas :

- Prof. Dr. Paulo Milton Barbosa Landim, Chefe

do Departamento de Geologia e Mineralogia da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, pela dedicação com que nos orientou, especialmente no que se refere às críticas e sugestões, sempre corretas. Particularmente agradecemos pelo incentivo e pela amizade com que sempre nos distinguiu.

- Prof. Dr. Paulo Cesar Soares, pelo auxílio prestado no decorrer de todo o trabalho e também nas viagens ao campo.

- Prof. Dr. Vicente José Fulfaro, pela orientação sempre segura, que muito nos ajudou na elaboração desse trabalho.

- À Universidade Estadual de Campinas, especialmente ao Dr. Pedro Moraes Siqueira, Diretor da Faculdade de Engenharia de Limeira e ao Sr. Mauro Fernandes, Secretário desta Faculdade, pelo apoio e auxílio prestados.

- À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo auxílio material que tornou possível a execução dessa pesquisa.

- Sr. José Roberto Caon, pela colaboração na computação dos dados.

- Sra. Isabel Cristina Delle Vedove, pela datilografia, Sr. Luis Angelo Alberto, pelos desenhos e acompanhamento ao campo, particularmente pelo zelo e cuidado com que executaram suas tarefas.

- Finalmente, a todos aqueles que direta ou indiretamente contribuíram para a realização do presente trabalho.

tro do anticlinal, evidenciada por um leve metamorfismo de contato do folhelho Estrada Nova no lado oeste do anticlinal.

Washburne (1930) conclui que aquela estrutura foi formada em pelo menos dois períodos de crescimento, devido as relações entre as formações aí existentes. Segundo ele "a oeste do anticlinal ocorre o derrame inferior de diabásio que descansa diretamente sobre a parte superior da formação de Corumbataí, mergulhando para sudoeste sob um ângulo de cerca de 15 graus. Indo-se deste ponto para sudeste, observa-se uma espessura mais e mais possante de arenito de Botucatu por baixo do diabásio, sendo este claramente do tipo extrusivo. É evidente que o cume do anticlinal tinha sido erodido até o folhelho de Corumbataí antes que se desse o primeiro derrame de diabásio".

"O período principal do seu levantamento, entre tanto, foi depois do último derrame de diabásio, que também está inclinado, no flanco sul do anticlinal". Não tendo solucionado completamente a questão, o autor recomendou estudos de magnetometria e sondagens rotativas.

São ainda feitas referências ao chamado anticlinal do Serrote, incluído dentro de nossa área de estudo, e que recebe hoje a denominação de Morro do Capitão.

Moraes Rego (1945) também estudou a região, teendo considerações sobre sua geologia e tectônica. Segundo ele, o relacionamento entre o dobramento das camadas e as rochas eruptivas é incontestável. A erupção não seria, porém, a causa eficiente para o dobramento, mas sim a sua consequência. Esta afirmação, de acordo com Moraes Rego, baseia-se no fato

de que em São Paulo há diques eruptivos cortando camadas pouco perturbadas. Entretanto, localmente, é possível o dobramento estar mais estreitamente relacionado com a erupção.

Seguindo a sugestão de Washburne, Moraes Rego executou na área do Pau D'Alho um levantamento magnetométrico, o qual revelou para a referida área variações magnetométricas bruscas, numa alternância de máximos e mínimos, que indicariam a existência de eruptivas em profundidade.

Almeida e Barbosa (1953) descrevendo a Tectônica das quadriculas de Piracicaba e Rio Claro também¹² fazem referências à Estrutura do Pau D'Alho, concordando com Washburne, de que uma primeira fase de soerguimento teria precedido os derrames que provavelmente seriam contemporâneos da grande intrusão.

3. GEOMORFOLOGIA

A área em estudo situa-se no interflúvio Piracaba - Tietê dentro da província geomorfológica denominada Depressão Periférica, que compreende áreas sedimentares de idade neopaleozóica rebaixadas pela erosão e delimitada a leste pelo Planalto Atlântico e a oeste pela Cuesta Basáltica. As altitudes médias situam-se entre 500 e 600 metros, sendo que apenas em determinados locais como na presente estrutura encontram-se altitudes maiores, atingindo cerca de 700 metros.

Deffontaines (1935) dividiu a Depressão Periférica em três partes, sendo que a Estrutura do Pau D'Alho situa-se na zona do médio Tietê.

De um modo geral, a topografia da zona é pouco acidentada. Há predominância de colinas baixas, suaves, separadas por vales jovens, sem planícies aluviais importantes, determinadas pela interseção dos perfis convexos das vertentes.

As camadas mergulham para noroeste, sendo que as litologias mais resistentes mostram-se salientes na topografia, constituindo cuestas.

É certo que perturbações locais das camadas influem, às vezes, na preservação das maiores elevações nas áreas interfluviais.

O caráter assimétrico do relevo e das cuestas pode ser explicado na área da Estrutura do Pau D'Alho pelas intrusivas básicas associadas a falhamentos e subsequente erosão diferencial.

Os principais rios que drenam a área são o Tietê

tê e o Piracicaba. O rio Tietê, que nasce no Planalto Atlântico penetra na Depressão Periférica na cachoeira de Salto, ao norte de Itu. Sua direção é NW, na direção do mergulho das camadas sedimentares, classificando-se geneticamente como um rio consequente. Próximo a Cuesta Basáltica recebe o rio Piracicaba como afluente da margem direita.

Já esse rio oferece aspectos mais variados em seu curso que os apresentados pelo rio Tietê ao atravessar a Depressão Periférica. Nasce também no Planalto Atlântico corre para noroeste, sendo portanto consequente. Na cidade de Piracicaba tem o rio o seu principal acidente, o salto de Piracicaba, devido a um sill de diabásio.

A montante deste salto o vale é estreito, apresentando nas margens escarpas de solapamento onde afloram rochas do Grupo Tubarão. Entre o salto de Piracicaba e Artemis o rio apresenta nítidos meandros encaixados nos sedimentos da Formação Estrada Nova e ampla sedimentação neocenozóica.

Após receber as águas do Rio Araguaí, o Piracicaba corre sobre sedimentos arenosos da Formação Pirambóia, que mudam completamente os aspectos de seu curso.

Quanto aos aspectos geomorfológicos específicos relativos a área do Pau D'Alho, Paula (1972) a divide em uma série de compartimentos, baseando-se fundamentalmente no caráter altimétrico :

1 - Superfície de Cimeira

Tal superfície entre 750 e 800 m, destaca-se no interflúvio Piracicaba - Tietê, sendo representada pelo topo dos morros Monte Branco, Pau D'Alho, São Joaquim, Floresta e Fortaleza, além de alguns morros isolados como o Ibicatu, Mandacaru e outros. Essa superfície é mantida por sills e diques de diabásio que capeiam rochas mais antigas.

Os processos erosivos ao constituírem esta superfície, foram condicionados pela estrutura pré-existente representada pelos blocos adernados por movimentação anterior.

2 - Superfície de 600 - 700 metros

Trata-se de pequenos interflúvios no reverso aplainado das cuestas mantidas por sills de diabásio intrometidos na Formação Estrada Nova, na área central da Estrutura, com resíduos de antigos sedimentos que foram reentalhados por novas fases erosivas e que se acham atualmente reduzidos a pequenas patamares articulados à base das escarpas que delimitam a borda da superfície de cimeira. São portanto níveis descontínuos, restritos a periferia dos relevos de cimeira, aparecendo também na área central da Estrutura.

Na parte externa da Estrutura esses interflúvios cortam o diabásio e o arenito Pirambóia e se inclinam suavemente em direção à drenagem regional, apresentando uma disposição radial.

3 - Superfície Interplanáltica de 550 - 600 metros.

Corresponde aos baixos interflúvios aplainados, de topo suavemente convexo e divisores principais da drenagem integrante da bacia do Tietê e Piracicaba. Acham-se cerca de 50 - 60 metros sobre os vales atuais. Pela forma suavemente inclinada e pela articulação em ângulo bem marcado com os patamares, indicam tratar-se de formas de sedimentação. Não há depósitos detríticos correspondentes a esta fase de aplainamento, a não ser colúvios esparsos em delgadas camadas, de transporte recente.

4 - Patamares Intermediários

Constituem prolongamento da superfície mais geral, após ruptura da vertente, nem sempre bem marcada ao longo da encosta, devido a homogeneidade da rocha e da colúviação presente que mascara as quebras de gradiente de declive. Estão cerca de 15 metros acima dos vales.

5 - Baixos Terraços

Estão a 3 ou 4 metros acima das várzeas e são esapeados por seixos, continuando em rampa ascendente até se articular aos patamares intermediários.

Tais terraços, nos rios que correm para o Piracicaba, estão esculpido no Pirambóia e na drenagem que deman

da o Tietê, estão entalhados na Formação Estrada Nova.

6 - Nível de Várzeas

Trata-se do nível atual. As várzeas são bastante exíguas porque os vales apresentam-se encaixados tanto na área central como na periferia do Pau D'Alho, indicando que as estruturas existentes na área sofreram reativações até a época atual.

4. GEOLOGIA GERAL

Para o conhecimento geológico da área foi feito um estudo fotointerpretativo com controle de campo.

Quando o trabalho estava quase concluído tomamos conhecimento do mapa geológico regional executado por Andrade e Soares (1971) para a Petrobrás. Desta maneira nos utilizamos deste mapa e introduzimos as modificações que julgamos necessárias após nossos trabalhos de campo. (Anexo)

4.1 - FOTOINTERPRETAÇÃO

4.1.1 - TIPO DE COBERTURA FOTOGRÁFICA

A área mapeada foi coberta por fotografias aéreas na escala 1:60.000, confeccionadas pela USAF, em 1965.

As fotos são em emulsão pancromática, no formato 23 x 23 cm tendo sido adquiridas do Serviço Geográfico do Exército.

4.1.2 - FOTOINTERPRETAÇÃO E VERIFICAÇÃO DE CAM-

PO

Foi realizada da seguinte maneira :

- a) Inicialmente tomou-se contato com a área através da bibliografia e da ida ao campo para coleta de dados preliminares;

FORMAÇÃO TATUI :

Nesta unidade litológica destaca-se como principal critério fotointerpretativo o seu relevo cuneiforme e sua cor cinza-claro.

FORMAÇÃO IRATI :

Apresenta cor cinza-médio a escuro, tendo como contato com a Formação Tatui uma nítida quebra negativa.

FORMAÇÃO ESTRADA NOVA :

Apresenta uma coloração cinza-escuro devido a seu caráter argiloso. As quebras negativas que correspondem aos contatos subjacente e sobrejacente são muitas vezes pouco distintas, necessitando-se de controle de campo.

FORMAÇÃO PIRAMBÓIA :

Mostra na fotografia aérea características semelhantes a Formação Itararé, porém com extensas chapadas areosas também cobertas por vegetação do tipo cerrado. Constituem excelente critério fotointerpretativo suas formas de relevo, resultantes da erosão diferencial, que mostram na fotografia aérea uma série de pequenos degraus, separados por quebras negativas, ao longo das quais se observam zonas de tonalidade cinza-escuro, devido a concentração de umidade.

4.2 - ESTRATIGRAFIA

O mapa geológico em anexo contém as unidades estratigráficas que serão descritas a seguir em suas principais características litológicas, estratigráficas e estruturais :

4.2.1 - FORMAÇÃO ITARARÉ (GRUPO TUBARÃO)

Essa unidade assenta-se sobre superfície de não conformidade, topograficamente irregular, onde ocorrem conglomerados basais.

É caracterizada por grande diversidade de litologia, onde predominam os clásticos grosseiros. Ocorre nas partes sudeste e norte da área estudada.

A litologia dessa formação consta de conglomerados e arenitos conglomeráticos basais, sucedidos por espesso pacote de siltitos, ritmitos e folhelhos várvidos. São comuns marcas de corrente, marcas onduladas e laminação cruzada.

Acima temos arenitos de granulação variada apresentando estratificação plano-paralela.

Sobrejacente aos arenitos predominam siltitos, argilitos, folhelhos e ritmitos, ocorrendo ainda corpos de diamictitos de cor cinza escuro. O topo dessa formação é caracterizado pela presença de diamictitos.

A espessura máxima admitida para esta formação é de 1.200 metros, de acordo com perfurações da Petrobrás.

4.2.2 - FORMAÇÃO TATUI (GRUPO TUBARÃO)

É formada por siltitos laminados de cor arroxeada e verde, com intercalações de camadas de marga e calcário, tornando-se às vezes predominantemente arenosos, com finas camadas de sílex. A parte superior apresenta-se bem laminada com marcas de ondas e estratificação cruzada. Esta formação ocorre numa faixa de direção aproximada leste-oeste, a qual inflete para o norte.

O contato desta unidade com a Formação Itararé é por discordância erosiva, sendo que com a Formação Irati o contato caracteriza-se por uma nítida superfície de descontinuidade.

Sua espessura atinge no máximo cerca de 100 metros, mostrando uma sensível redução para o norte do Estado de São Paulo.

4.2.3 - FORMAÇÃO IRATI (GRUPO PASSA DOIS)

Apresenta dois pacotes : o inferior constitui-se de folhelho e siltito cinza, tendo sido denominado Membro Taquaral por Barbosa e Almeida (1948); o superior, denominado Membro Assistência por Barbosa e Gomes (1958), apresenta uma alternância rítmica de folhelhos pretos pirobetuminosos e calcários dolomíticos, às vezes oolíticos, em finas lâminas. Na base ocorre um banco de calcário dolomítico, com marcas de corrente, gretas de contração e brecha intraformacional.

A espessura máxima é de 40 metros, sendo 30 de

Assistência e 10 metros de Taquaral.

A Formação Irati está localizada na parte sudeste da região estudada, numa faixa de direção leste-oeste, que inflete para o norte, acompanhando a Formação Tatui.

É importante salientar que embora Washburne (1930) tenha descrito a existência de folhelhos betuminosos da Formação Irati no interior da Estrutura do Pau D'Alho, nenhum indício de sua presença foi por nós constatado, durante nossos trabalhos de campo. É provável que se trate da Formação Estrada Nova, cujas rochas silto-argilosas são as únicas a aflorar no centro da Estrutura, alçadas que foram por falhamentos normais, de movimentos verticais e rotacionais.

4.2.4 - FORMAÇÃO ESTRADA NOVA (GRUPO PASSA DOIS)

Constitui-se em sua parte basal por um pacote de siltitos maciços de cores variando do roxo-acinzentado ao cinza-claro, aparentando falta de acamamento; apresenta às vezes concreções calcárias de forma elipsóide, lembrando a Formação Serra Alta dos estados sulinos (Landim, 1970).

A esse pacote segue-se uma sucessão de camadas siltosas intercaladas de maneira rítmica, dispostas sub-horizantal ou irregularmente, com lâminas ou estratos argilosos, silto-argilosos, areno-sílticos e arenitos finos. Tais camadas, que tem grande continuidade física vertical, geralmente centimétrica, variam bastante lateralmente.

São comuns bancos de siltito calcífero. As estruturas sedimentares mais comuns são estratificação rítmica,

marcas onduladas, gretas de contração, brechas intraformacionais e camadasoolíticas.

O contato com a Formação Irati é caracterizado pela perda do caráter betuminoso dos folhelhos.

A espessura máxima da Formação Estrada Nova é de cerca de 150 metros (Landim, 1970). Deve ser salientado aqui que as espessuras obtidas diretamente dessa e de outras formações através os perfis geológicos são incompletas e parciais devido ao caráter tectônico da área, que se encontra intensamente falhado e principalmente pelo fato de não ter sido nosso objetivo principal fazer um levantamento estratigráfico de detalhe.

A Formação Estrada Nova aflora na parte sul da área e numa larga faixa de direção norte-sul localizada na porção centro leste do mapa. No interior da Estrutura do Pau D'Alho esta formação constitui um alto estrutural, tendo sido alçada ao nível do arenito Pirambóia.

4.2.5 - FORMAÇÃO PIRAMBÓIA (GRUPO SÃO BENTO)

Constitui-se de arenitos de granulação média a muito fina, raramente grosseira, silto-argilosos, de cor branca a avermelhada, grãos polidos sub-arredondados a sub-angulares, com finas camadas de argila e siltitos. Apresenta notável estratificação cruzada acanalada e cruzada planar.

São característicos grandes bancos de arenito com estratificação cruzada planar separados por camadas silto-argilosas, às vezes de argila com estratificação plano-paralela.

O contato da Formação Pirambóia com a Formação Estrada Nova é uma discordância erosiva. Existe na sua base uma brecha areno-argilosa, com fragmentos argilosos de siltitos da unidade subjacente, não retrabalhados, que constitui um regolito fóssil, com espessura não superior a 3 metros. Esta brecha está bem exposta no Km 81,5 do perfil A-B (Fig. 2).

O contato com a unidade superior, arenitos eólicas da Formação Botucatu é gradacional. Uma zona de mudanças das características texturais dos arenitos apresenta mais ou menos 10 metros de espessura.

A espessura desta formação é de 200 metros, aumentando para oeste.

Suas características faciológicas indicam ambiente continental, com depósitos de rios meandранtes e anastomosados, de planícies de inundação e pequenas lagoas, em condições oxidantes. Os extensos bancos de arenito com estratificação planar bastante inclinada são formados pela migração do canal de grandes rios, em diversos ciclos, cada qual truncando suavemente os depósitos de inundações anteriores.

Ocorre na parte centro-oeste da área.

4.2.6 - FORMAÇÃO BOTUCATU (GRUPO SÃO BENTO)

A Formação Botucatu é constituída de arenitos de granulação média a fina, bem selecionados, sem matriz, muito porosos, friáveis e com grãos foscos. Dispõem-se normalmente em grandes cunhas com estratificação cruzada de grande porte tangencial na base. A estratificação é dada por alternância

O contato da Formação Pirambôia com a Formação Estrada Nova é uma discordância erosiva. Existe na sua base uma brecha areno-argilosa, com fragmentos argilosos de siltitos da unidade subjacente, não retrabalhados, que constitui um regolito fóssil, com espessura não superior a 3 metros. Esta brecha está bem exposta no Km 81,5 do perfil A-B (Fig. 2).

O contato com a unidade superior, arenitos eólicos da Formação Botucatu é gradacional. Uma zona de mudanças das características texturais dos arenitos apresenta mais ou menos 10 metros de espessura.

A espessura desta formação é de 200 metros, aumentando para oeste.

Suas características faciológicas indicam ambiente continental, com depósitos de rios meandrantos e anastomosados, de planícies de inundação e pequenas lagoas, em condições oxidantes. Os extensos bancos de arenito com estratificação planar bastante inclinada são formados pela migração do canal de grandes rios, em diversos ciclos, cada qual truncando suavemente os depósitos de inundações anteriores.

Ocorre na parte centro-oeste da área.

4.2.6 - FORMAÇÃO BOTUCATU (GRUPO SÃO BENTO)

A Formação Botucatu é constituída de arenitos de granulação média a fina, bem selecionados, sem matriz, muito porosos, friáveis e com grãos foscos. Dispõem-se normalmente em grandes cunhas com estratificação cruzada de grande porte tangencial na base. A estratificação é dada por alternância

rítmica de granulação média e fina, raramente grosseira ou muito fina. Nos planos dos estratos é comum ocorrerem marcas onduladas.

Assenta-se concordantemente sobre a Formação Pirambóia. O contato com a unidade superior, derrames basálticos, é complexo em muitas áreas em virtude da ocorrência de interdigitamento e recorrência de litologias. Em nossa área ocorre apenas no setor noroeste do mapa geológico.

A espessura da Formação Botucatu foi medida na Serra de São Pedro atingindo um máximo de 100 metros, constituindo-se na parte inferior das encostas mantidas pelo basalto.

A Formação Botucatu é constituída de depósitos de areias transportados pelo vento em um ambiente de condições predominantemente desérticas.

4.2.7 - FORMAÇÃO SERRA GERAL (GRUPO SÃO BENTO)

É uma sequência vulcânica constituída de basaltos toleíticos. Na base ocorrem arenitos semelhantes ao Botucatu em finas camadas intercaladas nos derrames.

Os basaltos encontram-se bastante intemperizados com um fraturamento muito pronunciado. Na Serra de São Pedro nota-se nas encostas zonas coluviais constituídas de blocos decompostos de basalto.

A espessura máxima medida também na Serra de São Pedro é de aproximadamente 100 metros.

O contato desta com a Formação Bauru é por dis-

cordância, sendo que esta superfície encontra-se pouco ondulada, representando um ciclo de peneplanização pré-Bauru. Aflo-
ra apenas no flanco noroeste da área, na Serra de São Pedro.
(Fig. 4, perfil E-F)

4.2.8 - INTRUSIVAS BÁSICAS

As intrusivas básicas ocorrentes na região estu-
dada constituem-se de diabásios toleíticos, geralmente associa-
dos às formações subjacentes ao arenito Pirambóia.

Na maioria dos casos estão relacionadas a falha-
mentos e constituem intrusões concordantes e discordantes, sills
e diques respectivamente.

Na parte central da área, foi evidenciado pelos
perfis geológicos, que os morros que se destacam no relevo, são
capeados por diabásio, mais resistente à erosão que os sedimen-
tos adjacentes (Fig. 2, perfil A-B).

As espessuras desses corpos intrusivos são mui-
to variáveis, de poucos metros a cerca de 50 metros no Morro
da Fortaleza (Fig. 2, perfil A-B).

Geneticamente, os diabásios estão ligados a For
mação Serra Geral, tendo a mesma idade, Cretácio inferior.

4.2.9 - FORMAÇÃO BAURU

Constitui-se predominantemente de arenitos de
cores avermelhadas e amareladas, granulação média a muito fi-
na; raramente ocorrem camadas com siltitos e argilitos ou are-

ritos conglomeráticos.

A espessura máxima observada foi de 30 metros, sendo localmente coberta por areias inconsolidadas de idade neoceno-zoica. Afloram estes sedimentos no topo da Serra de São Pedro, em contato com a Formação Serra Geral.

5. GEOLOGIA ESTRUTURAL

Com o mapeamento que realizamos na primeira etapa desse trabalho, ficou evidenciada, no centro do mapa geológico, uma estrutura que vem sendo objeto de estudos há já muitos anos por eminentes geólogos.

Foi com o objetivo de trazer novos dados ao estudo estrutural daquela área que executamos uma série de perfis geológicos atravessando estrategicamente a Estrutura do Pico D'Alho.

Além disso, era nossa intenção, inicialmente, fazer um levantamento de fraturas porventura existentes nos afloramentos da região mapeada. Porém, com o conhecimento que tínhamos da área, através o estudo fotointerpretativo das fotografias aéreas e a confecção dos perfis geológicos, chegamos a conclusão que este tipo de trabalho não poderia ser executado, devido a falta de bons afloramentos apresentando fraturamento complexo e a presença de extensa cobertura de sedimentos neógenos. Em vista disso adotamos um outro critério que será descrito no capítulo 5.2.

5.1 - PERFIS GEOLÓGICOS

5.1.1 - METODOLOGIA

Os perfis foram feitos em várias campanhas de campo em que usamos bússola para a orientação do sentido das estruturas e da atitude das camadas geológicas, o odômetro do ji

pa para controlar as distâncias percorridas e um altímetro Pau
lin com precisão até 1 metro. As leituras com o altímetro eram
 feitas sempre em relação a estação anterior, após as quais era
 novamente colocado em zero, de tal maneira que todas as leitu
 ras eram relativas, o que diminui ao mínimo os erros devido
 a variações atmosféricas.

Como as camadas geológicas apresentam mergulhos
 de pequeno valor, variando de $0,5^{\circ}$ a 7° , todas as medidas fo
 ram efetuadas pelo método dos três pontos, em que se empregou
 clinômetro e trena.

Após o levantamento geológico de todas as estra
das pesquisadas, confeccionou-se para cada uma delas uma plan
ta na escala de 1:50.000, com os dados coletados diretamente
 no campo.

Todos os pontos levantados de cada uma das es
tradas foram retificados, sofrendo um rebatimento segundo a
 melhor reta que passa pelos pontos, de acordo com o princípio
 dos mínimos quadrados. Em seguida construiu-se os perfis topo
 gráficos que possuem cotas absolutas extraídas das folhas to
 pográficas 1:50.000 do Instituto Geográfico e Geológico. A ati
tude das camadas foi modificada de acordo com a direção do per
fil.

Todos os perfis atravessam a Estrutura pesquisa
da e foram assim denominados :

- a) Perfil A-B (Anhembi - Piracicaba), ao longo da rodovia de
 terra Piracicaba-Botucatu, com um comprimento total de 83
 quilômetros e retificado segundo a direção N85E. (Fig. 2)

pe para controlar as distâncias percorridas e um altímetro Paulin com precisão até 1 metro. As leituras com o altímetro eram feitas sempre em relação a estação anterior, após as quais era novamente colocado em zero, de tal maneira que todas as leituras eram relativas, o que diminui ao mínimo os erros devido a variações atmosféricas.

Como as camadas geológicas apresentam mergulhos de pequeno valor, variando de $0,5^{\circ}$ a 7° , todas as medidas foram efetuadas pelo método dos três pontos, em que se empregou clinômetro e trena.

Após o levantamento geológico de todas as estradas pesquisadas, confeccionou-se para cada uma delas uma planta na escala de 1:50.000, com os dados coletados diretamente no campo.

Todos os pontos levantados de cada uma das estradas foram retificados, sofrendo um rebatimento segundo a melhor reta que passa pelos pontos, de acordo com o princípio dos mínimos quadrados. Em seguida construiu-se os perfis topográficos que possuem cotas absolutas extraídas das folhas topográficas 1:50.000 do Instituto Geográfico e Geológico. A atitude das camadas foi modificada de acordo com a direção do perfil.

Todos os perfis atravessam a Estrutura pesquisada e foram assim denominados :

- a) Perfil A-B (Anhembi - Piracicaba), ao longo da rodovia de terra Piracicaba-Botucatu, com um comprimento total de 83 quilômetros e retificado segundo a direção N85E. (Fig. 2)

- b) Perfil C-D (Capela Santa Cruz-Chácara Três Marias), ao longo da rodovia de terra Piracicaba-Anhumas, num total de 34 quilômetros e retificado segundo a direção N40E. (Fig. 3)
- c) Perfil E-F (Serra de São Pedro-Pau D'Alho), ao longo da rodovia asfaltada Piracicaba-São Pedro, sendo parte do perfil na estrada Artemis-Pau D'Alho, num total de 37 quilômetros e retificado segundo a direção N30W. (Fig. 4)
- d) Perfil G-H (Pederneiras-Jardim São Jorge), ao longo da rodovia de terra Piracicaba-Conchas, num total de 26 quilômetros e retificado segundo a direção N45E. (Fig. 5)

As estradas em que foram realizados os perfis geológicos estão representadas no mapa geológico anexo.

5.1.2 - RESULTADOS

Embora tenhamos realizado o mapeamento fotogeológico de uma área mais ampla, nosso objetivo principal foi detalhar a área da Estrutura do Pau D'Alho, cujas feições principais podem ser vistas na foto 1.

Da observação dos perfis geológicos realizados verifica-se o mergulho regional suave para oeste, da ordem de 1 grau. Tal situação é modificada localmente por um grande número de falhas que ocorrem na região. Estas falhas são normais, geralmente escalonadas, com rejeitos de ordem de dezenas de metros e com planos verticais e subverticais.

Algumas falhas, porém, apresentam movimentos complexos, muitas vezes com basculamentos, devido a deslocamentos

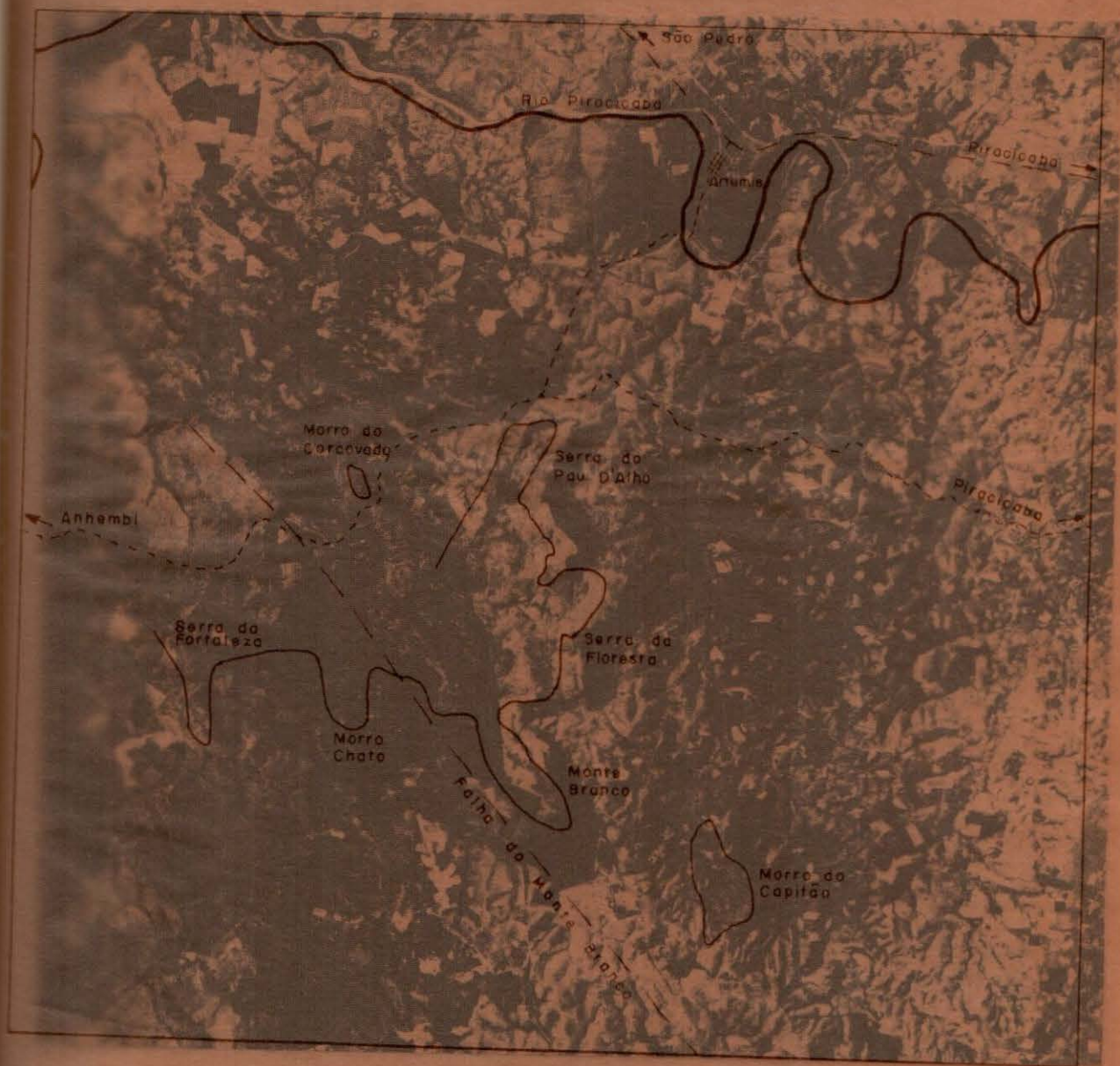


Foto 1 - Vista aérea parcial da área da Estrutura do Pau D' Alho, destacando-se seus principais acidentes geográficos. Escala aproximada - 1:138.000



Fig. 1 - Vista aérea parcial da área da Estrutura do Pau D'Alho, destacando-se seus principais acidentes geográficos. Escala aproximada - 1:138.000

rotacionais. Este tipo de falhamento é mostrado no Ribeirão dos Marins no Perfil A-B, figura 2.

A direção principal dos falhamentos é N40W, sendo que a falha principal é a do Monte Branco, que acompanha o flanco oeste da Estrutura. Tem uma extensão de aproximadamente 20 quilômetros, podendo no entanto ser prolongada tanto ao norte como ao sul da Estrutura do Pau D'Alho.

Verifica-se, pela análise dos perfis, que há realmente um sistema de falhamento conspícuo na área, que ocasionou o soerguimento do bloco onde ocorre a Formação Estrada Nova. Nos blocos rebaixados ocorre diabásio capeando os morros testemunhos.

Muitas das falhas estão associadas a intrusões de corpos concordantes e discordantes de magmatitos básicos. Muitos dos morros da região são diques associados a falhas, como por exemplo o morro do Corcovado (foto 2). Outros morros são capeados por sills de diabásio, como a Serra do Pau D'Alho (foto 3).

Como verificado pelos perfis, a Estrutura do Pau D'Alho é portanto um alto estrutural, sendo limitada a leste por outras falhas paralelas a de Monte Branco. Esse alto estrutural foi bem evidenciado pelos perfis geológicos, uma vez que todos os contatos Estrada Nova - Pirambóia são por falhas.

No Km 54,5 do Perfil A-B (fig. 2), observa-se um afloramento de um ritmito pertencente à Formação Estrada Nova, muito endurecido pelo contato com o magmatito e que mergulha contra o sentido regional (fotos 4 e 5). É comum na área encontrar-se drags de falha, com mergulhos às vezes chegando a 25 graus.

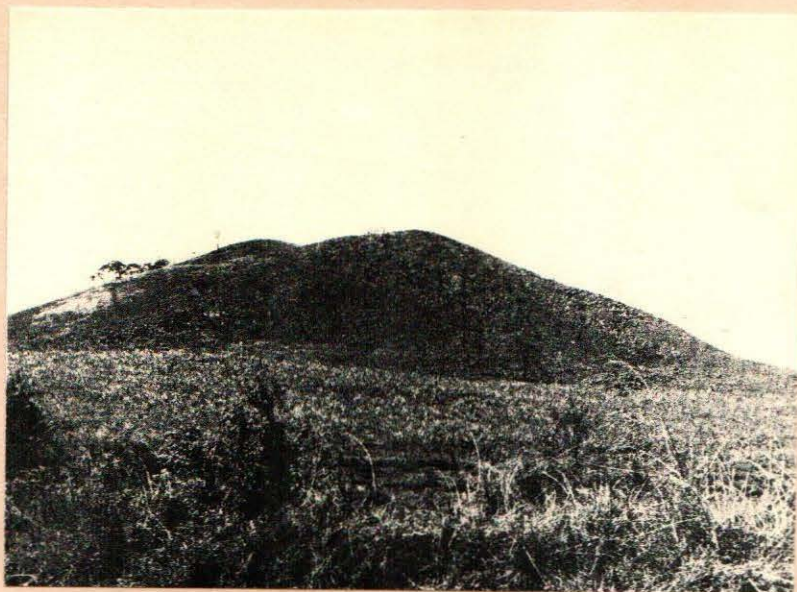


Foto 2 - Morro do Corcovado, constituído por um dique de diabásio. Km 54,8 perfil A-B. Fig. 2

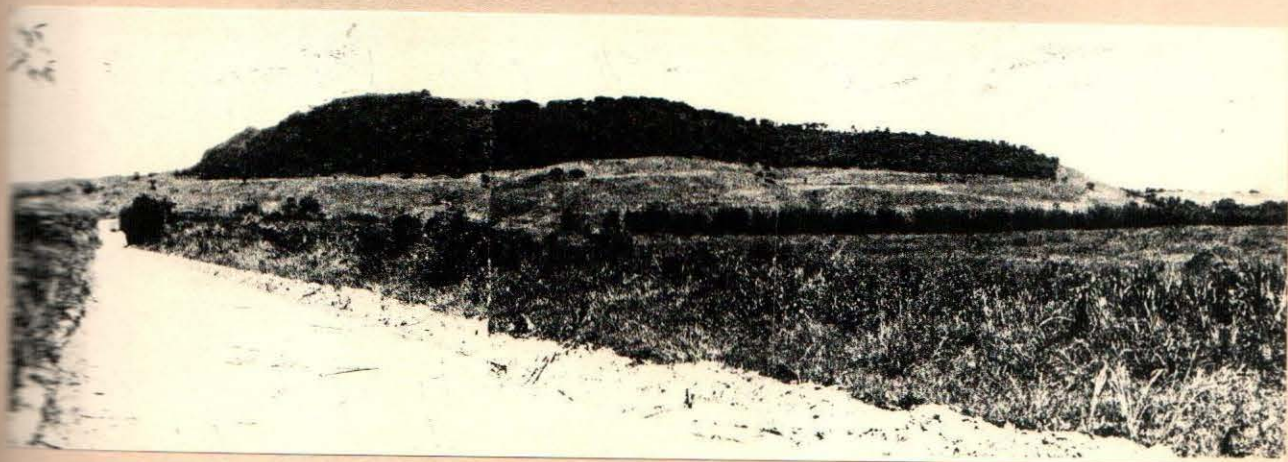


Foto 3 - Vista oeste da Serra do Pau D'Alho, capeada por um sill de diabásio.



Foto 4 - Afloramento da Formação Estrada Nova mergulhando 7° para NE, contrário ao mergulho regional. Esses sedimentos foram metamorfizados em contato com o diabásio do Morro do Corcovado. Km 54,5 do perfil A-B. Fig. 2.



Foto 5 - Mesmo afloramento anterior, mostrando uma pequena dobra, em que o martelo representa o eixo, com mergulhos segundo as setas. Note-se a abundância de diaclases, raras em outros afloramentos.

Devido a constância da presença conjunta de sills e diques em todos os perfis, aventou-se um mecanismo, que é esquematizado no perfil A-B, fig. 2, segundo o qual juntamente com o falhamento, haveria a intrusão de magma básico, o qual se introduziria nas rochas tanto na forma de diques como de sills, como se pode notar nas serras do Pau D'Alho, Serra da Fortaleza, Monte Branco, etc.

Desta maneira as coberturas magmáticas desses morros não são aqui interpretados como derrames, como anteriormente se julgava, mas sim como jazimentos intrusivos concordantes. Isto é evidenciado no perfil E-F, fig. 4, pelo desnível de aproximadamente 300 metros entre o basalto da Serra de São Pedro e o diabásio da Serra do Pau D'Alho, sendo que entre ambos não ocorrem falhamentos dignos de nota.

Os afloramentos percorridos na área por ocasião da confecção dos perfis não são muito abundantes, principalmente onde aflora o arenito Pirambóia, que é na sua maior parte coberto por sedimentos cenozóicos.

Os contatos de um modo geral são graduais, havendo em certos locais, como próximo ao Ribeirão Pederneiras, (Perfil G-H, fig. 5) uma semelhança enorme entre Estrada Nova e Pirambóia, dificultando muito a distinção entre ambos.

A Formação Pirambóia em alguns afloramentos (fotos 6 e 7) mostra seu aspecto característico, com estratificação cruzada, diastemas, mas na maior parte dos afloramentos, principalmente no setor oeste, ela é reconhecida por sua estrutura maculada característica, não se observando estratificações evidentes.



Foto 6 - Afloramento da Formação Pirambóia, notando-se estratificação cruzada e marcas de onda. Km 13,3 do perfil G-H. Fig. 5.



Foto 7 - Formação Pirambóia, salientando um diastema apresentando na parte inferior arenito com estratificação plano paralela e na parte superior estrutura inclinada incipiente. Km 20,5 do perfil C-D, base do Morro do Capitão. Fig. 3.

Um aspecto interessante observado durante a realização dos perfis é a presença de uma brecha que aparece quase sempre nos contatos entre a Formação Estrada Nova e a Formação Pirambóia, como é mostrado no Perfil G-H, no Km 81,5, na localidade denominada Jardim São Jorge (fotos 8 e 9). Outros autores, como Bósio (1973) e Fulfaro (1967) citam exemplos de existência desta brecha dentro da Formação Pirambóia.

Embora não fosse nosso objetivo principal, reconhecemos em nossos perfis as estruturas dômicas de Anhembi e Artemis (fig. 2 e 4), as quais possuem um mecanismo de soerguimento provocado muito provavelmente por intrusões de magmatitos, mecanismo este diferente daquele ocorrente na Estrutura do Pau D'Alho, ocasionado por falhamentos normais e rotacionais.

5.2 - LEVANTAMENTO ESTATÍSTICO DE FRATURAS

5.2.1 - INTRODUÇÃO

Verificada a presença de um alto estrutural através de método geológico convencional, isto é, perfis geolôgicos, resolvemos tentar aplicar uma metodologia ainda não perfeitamente difundida entre nós, ou seja, a utilização de fraturas a partir de fotografias aéreas, com a finalidade de comparando os resultados testar o método.

Pesquisas geológicas de cunho estrutural, estratigráfico e genético vêm empregando cada vez mais frequentemente métodos estatísticos, facilmente aplicáveis hoje pela utilização de computadores. Todavia, o emprego de métodos estatísti

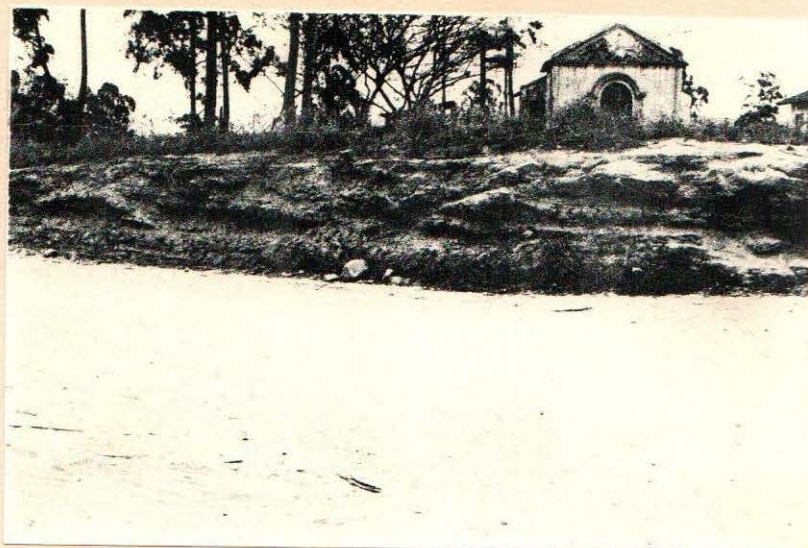


Foto 8 - Vista geral do afloramento de uma brecha no Km 81,5 do perfil A-B. Fig. 2.



Foto 9 - Detalhe da brecha acima descrita, notando-se o contato com a Formação Estrada Nova, a ela sotoposta.

cos a dados angulares como no caso da direção de fraturas, encerra ainda uma série de dificuldades de caráter teórico. Vide a propósito Steinmetz (1962) e Jones (1967).

Um dos primeiros pesquisadores a se interessar pelo assunto foi Krumbein (1939), que apresentou um método estatístico no estudo do eixo maior de seixos em depósitos sedimentares com o objetivo de determinar a sua orientação preferencial e conseqüentemente a direção de fluxo de transporte.

Nesse caso, o método foi empregado para dados direcionais univariados, pois, embora tenham sido medidos o mergulho do eixo maior de cada seixo e os respectivos rumos, utilizou-se apenas das direções dos eixos. A metodologia para processamento dos dados pode ser assim sumariada :

- a) Os azimutes são agrupados em classes com intervalos regulares e é anotada a sua frequência para cada classe.
- b) O ponto médio de cada classe é duplicado e calcula-se o seno e o cosseno desse ângulo.
- c) Multiplica-se o seno e o cosseno de cada classe pela frequência da mesma.
- d) Efetua-se a somatória das colunas dos senos e dos cossenos.
- e) Finalmente é calculada a tangente do vetor médio pela divisão da somatória dos senos pela somatória dos cossenos. O valor angular é dividido por 2 por ter sido inicialmente duplicado. Pelo sinal do seno e cosseno pode-se saber o quadrante a que pertence o azimuth médio resultante.

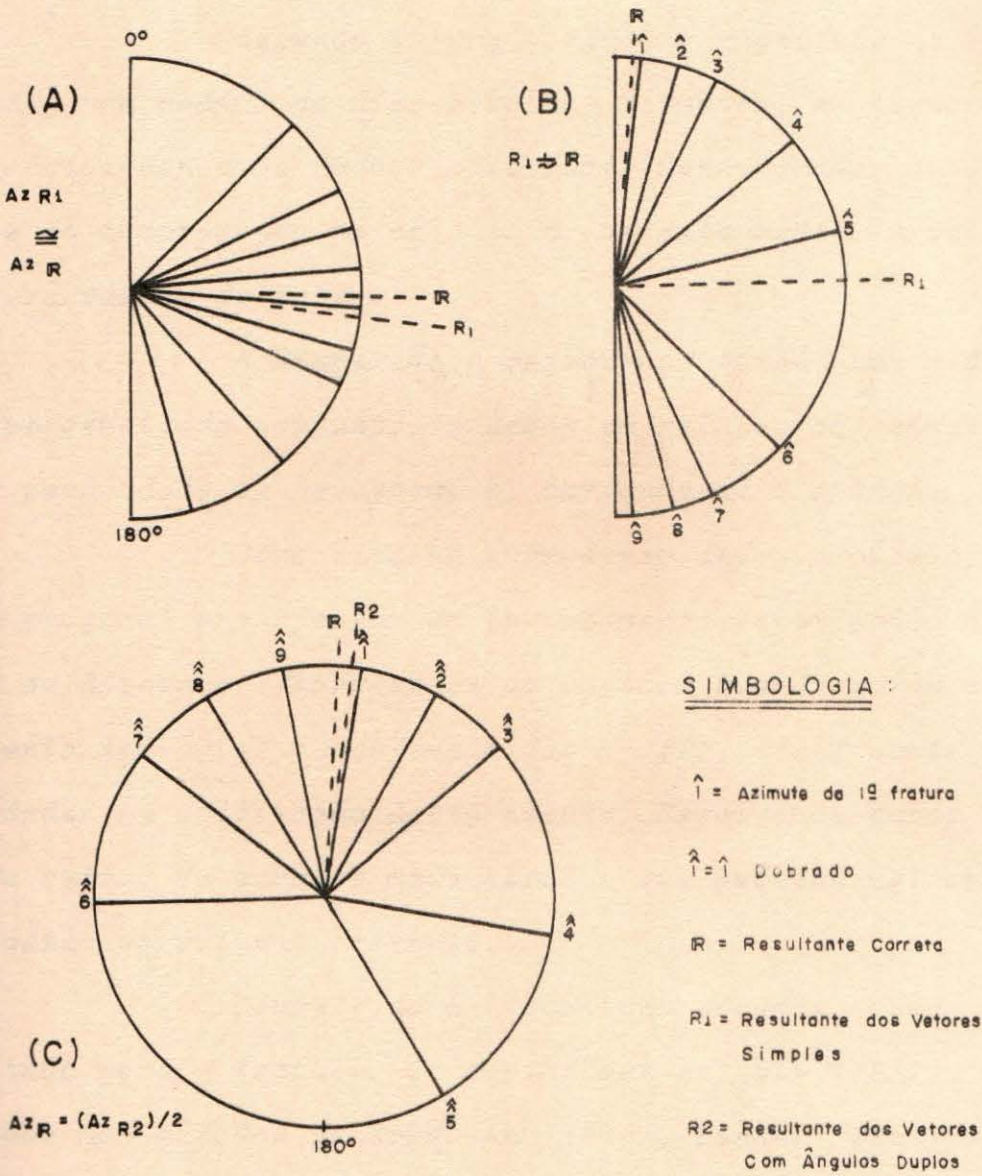
Quando não se utilizam dados vetoriais, isto é, dados que possuam sentido, há necessidade de se duplicar os azimutes. O erro em que se incorre por não se duplicar os azimutes quando se empregam dados direcionais, que variam de 0° a 180° , pode ser verificado na fig. 6.

No caso A, o erro é atenuado pela concentração simétrica de azimutes em torno de 90° ; no caso B, o erro é bem acentuado, pelo fato de que a maioria dos azimutes são próximos de 0° ou 180° , compensando-se entre si, enquanto os poucos azimutes próximos de 90° não tem azimute oeste que os compensem. Qualquer que se seja a distribuição, portanto, a resultante R_1 é sempre próxima de 90° . O caso C, da mesma figura, ilustra o processo correto de se calcular a resultante da distribuição B, através da duplicação dos azimutes.

Nos casos onde os dados direcionais empregados são obtidos a partir de uma distribuição variando de 0° a 90° (quadrante), é necessário que os azimutes direcionais sejam quadruplicados (Pincus, 1956).

Baseando-se em Krumbein (1939) e Curray (1956), Pincus (1956) desenvolveu uma metodologia para dados geológicos bivariados, isto é, envolvendo, por exemplo, rumo e mergulho. Seu método é de fácil aplicação, tendo o autor preparado uma tabela onde os dados são diretamente computados. Neste processo, o azimute resultante é obtido através o mesmo procedimento utilizado por Krumbein, sendo ainda obtidos os valores do módulo da resultante (R) e a dispersão (d), através as fórmulas :

$$R = \sqrt{(\sum_i^n \text{sen } \alpha_i)^2 + (\sum_i^n \text{cos } \alpha_i)^2}$$



CÁLCULO DA RESULTANTE DE UMA
DISTRIBUIÇÃO SEMI-CIRCULAR
DE FRATURAS

Seg. NORTHFLEET (1971)

FIG. 6

$$d = \left(\frac{R}{N} \right) \times 100, \text{ onde } N \text{ é o número de dados.}$$

Segundo Curray (1955), a magnitude da resultante R é uma medida da dispersão dos azimutes, em torno do azimute médio. Sendo os dados individuais considerados como unitários em comprimento no cálculo do azimute médio, o valor de R deverá variar de zero a N .

A dispersão d representa também uma medida da convergência do conjunto de dados em relação ao azimute obtido, sendo dada em percentagem, variando de 0 a 100%.

Como dito na introdução desse capítulo, a intenção original era efetuar um levantamento estatístico de fraturas em diversos afloramentos da região. Quando porém do levantamento geológico e confecção dos perfis, verificamos as dificuldades na utilização deste método. Resolvemos então apelar para outro, de caráter mais geral e que pudesse melhor revelar o padrão estrutural presente.

Consultada a literatura tivemos nossa atenção voltada para o trabalho de Northfleet et alli (1971), que baseados nos métodos de Krumbein (1939), Pincus (1956) e Fox (1967), efetuaram estudos reais e simulados de análise de tendência em áreas tectonicamente perturbadas de caráter positivo e negativo do Recôncavo Baiano, com o objetivo de, a partir do estudo de fraturas, por fotointerpretação, reconhecer feições estruturais favoráveis a presença de petróleo.

Assim, nos baseamos no fato de que a crosta terrestre possui um padrão característico de fraturamento e que pode ser modificado localmente por falta de homogeneidade da

5.2.2 - METODOLOGIA

Através fotografias aéreas, na escala 1:60.000, efetuou-se o levantamento de todas as fraturas de drenagem e relevo, num total de 2406.

Para efeito dos cálculos foram consideradas todas as fraturas cujas dimensões variavam entre 100 e 3.000 metros.

Posteriormente essas fraturas foram restituidas por meio do "Sketchmaster" e desenhadas originalmente num mapa na escala 1:50.000. O mapa de fraturas em escala reduzida é apresentado na fig. 7.

Para o levantamento destas fraturas foi confecionada uma grade com celas quadradas de 6 cm de lado, representando uma área de 9 Km^2 , cada uma, num total de 100 celas unitárias.

Toda fratura total ou parcialmente contida em cada cela foi medida com um transferidor, sendo os azimutes lidos no sistema internacional. O comprimento de cada fratura foi medido em milímetros.

Para o estudo estatístico efetuado calculou-se o azimuth médio para cada conjunto de 4 celas de tal maneira que cada cela participa do cálculo de quatro conjuntos diferentes. De acordo com a fig. 8 a cela 1A é constituída pelas pequenas celas 1A1, 1A2, 1A3 e 1A4. A cela 3A é constituída pelas pequenas celas 3A1, 3A2, 3A3 e 3A4. Já a cela 2A é constituída por metade da cela 1A e metade da cela 3A, ou seja pelas pequenas celas 1A1, 1A2, 3A3 e 3A4, sendo que para as outras celas

LOCALIZAÇÃO DAS FRATURAS NA ÁREA DA ESTRUTURA DO PAU D'ALHO

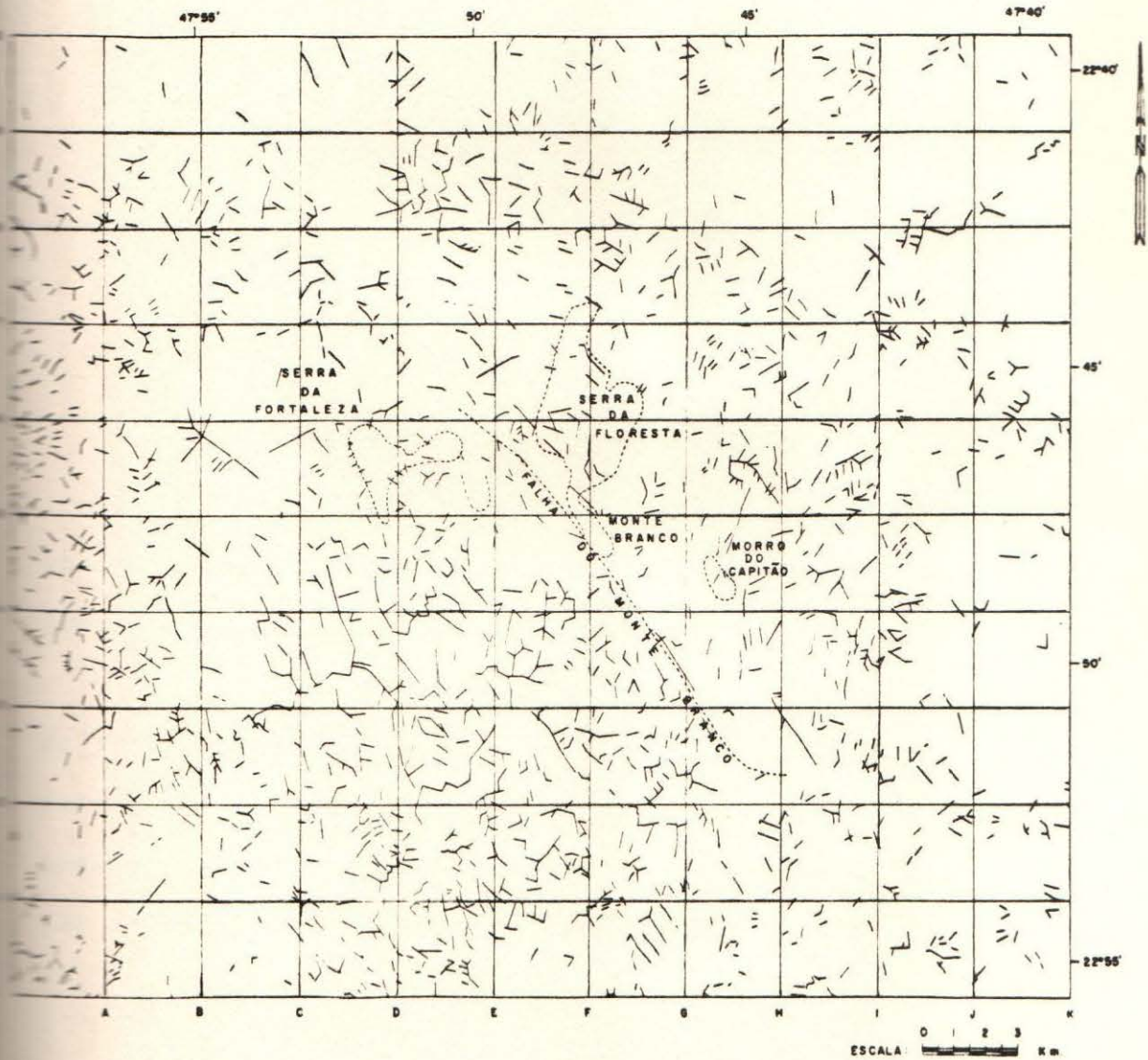


FIG. 7

o raciocínio é o mesmo.

	1	2	1	2
3	3	4	3	4
2	1	2	1	2
1	3	4	3	4
	A	B	C	

FIG. 8

Grade de celas unitárias para o estudo de fraturas.

Todos os cálculos estatísticos e trigonométricos foram executados em calculadoras eletrônicas Hewlett Packard mod. 10 e Compucorp mod. 320 G.

Com os dados conseguidos através o levantamento de fraturas passou-se para uma segunda etapa, onde empregamos quatro métodos estatísticos tendo como objetivo a melhor interpretação dos fenômenos tectônicos ocorrentes na área e verificação de qual o método que se adaptaria melhor à situação geológica.

Os processos utilizados foram os seguintes :

- Método da duplicação dos azimutes
- Método da resultante única
- Método das resultantes parciais
- Método da análise de tendência vetorial

A seguir, para melhor compreensão dos processos usados, destacamos a metodologia, resultados e conclusões obtidas para cada um deles, sendo que ao final do capítulo será feita uma comparação entre eles.

5.2.2.1 - MÉTODO DA DUPLICAÇÃO DOS AZIMUTES

Empregou-se aqui o método preconizado por Krumbein (1939) com algumas modificações :

- a) São duplicados todos os azimutes das fraturas contidas total ou parcialmente em cada cela.
- b) Calcula-se o seno e o cosseno de cada azimuth duplicado.
- c) Multiplica-se o seno e o cosseno de cada azimuth pelo seu respectivo módulo (m_i).
- d) Efetua-se a somatória das colunas dos senos e cossenos.
- e) Calcula-se a tangente do azimuth médio pela divisão da somatória, dos senos pela somatória dos cossenos, de acordo com a fórmula

$$2\theta_m = \arctg \frac{\{\sum_i^n m_i \cdot \text{sen}_{2\theta_i}\}}{\{\sum_i^n m_i \cdot \text{cos}_{2\theta_i}\}}$$

O valor angular é dividido por 2 por ter sido inicialmente duplicado. Desta forma cada cela passa a ser representada por uma única fratura, que é o azimuth médio da cela, com valor angular

e módulo determinado. Como se pode observar foram introduzidas algumas modificações, explicadas a seguir :

- No item a os azimutes não foram agrupados em intervalos regulares para posteriormente duplicar-se o ponto médio do intervalo e calcular-se as funções trigonométricas correspondentes. Duplicando cada azimuth e calculando-se seus senos e cossenos individualmente obtém-se uma precisão maior. Tal procedimento só foi possível devido a facilidade da utilização de calculadoras eletrônicas.
- No item c, as fraturas não foram consideradas como de módulo unitário, da maneira concebida por Krumbein, mas sim com os seus respectivos comprimentos, o que possibilitou um tratamento ponderal mais real, uma vez que desta maneira, a resultante entre duas fraturas de direções e módulos diferentes tende mais para o lado da fratura de maior dimensão modular.

Um dos inconvenientes no emprego do método da duplicação dos azimutes é que a dispersão medida não corresponde a realidade, uma vez que os ângulos originais foram duplicados, sendo a dispersão aumentada artificialmente. Como esta medida tem o significado estatístico do desvio padrão, verifica-se de imediato a sua importância.

Os resultados obtidos por este método são mostrados na fig. 9. Da análise desse mapa nota-se um padrão ge-

MAPA DOS AZIMUTES MÉDIOS
MÉTODO DOS AZIMUTES DUPLICADOS

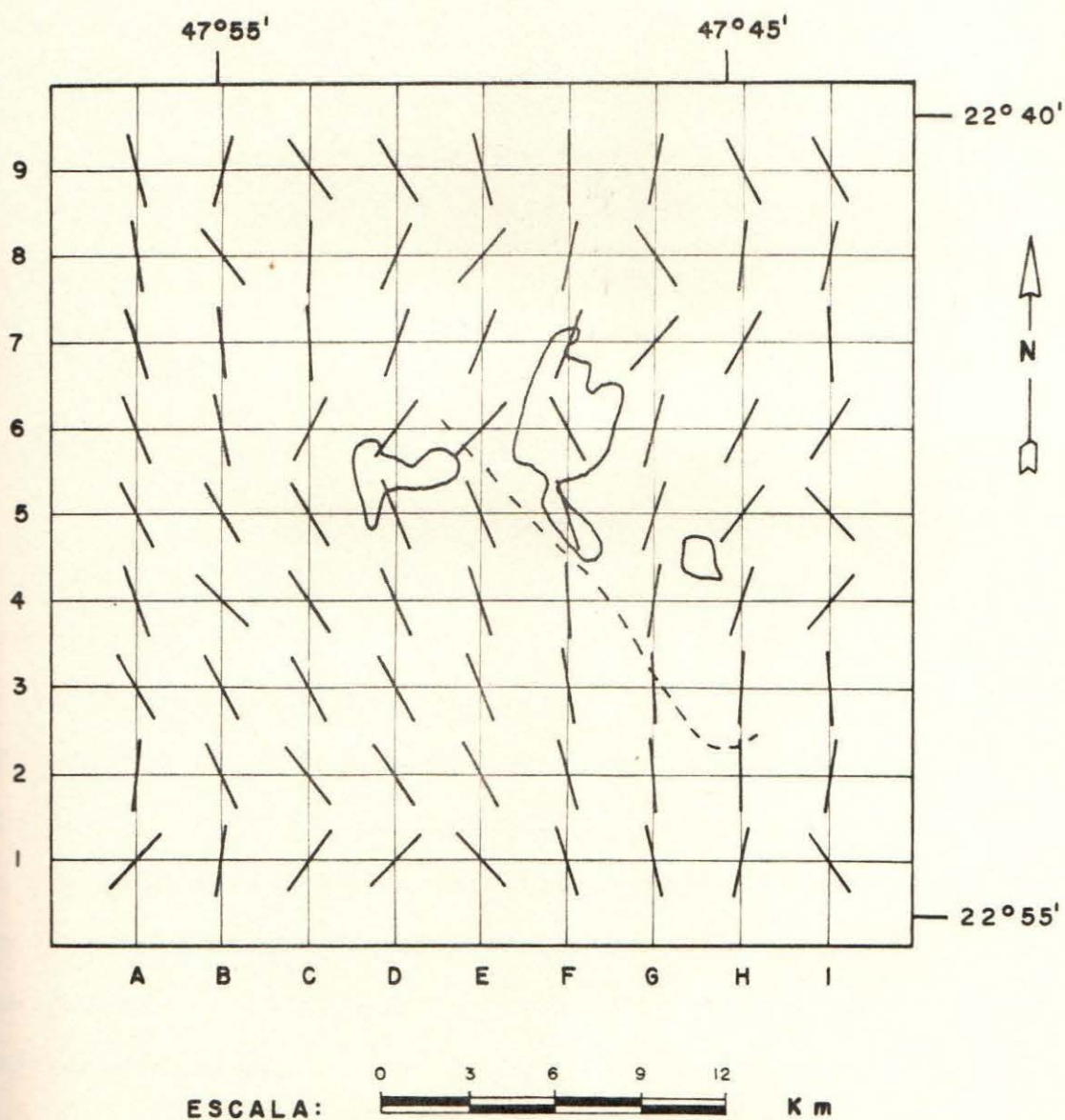


FIG. 9

ral de fraturamento aproximadamente NORTE-SUL nas bordas, enquanto que ao redor da Estrutura do Pau D'Alho é notada uma perturbação maior com padrões de fraturamento NW nas porções SW e NE sendo que o padrão é notadamente NE nos setores NW e SE da estrutura. Essas perturbações teriam origem nos movimentos tec tônicos que ocorreram na área através falhamentos e intrusões e que modificaram os padrões normais de fraturamento das rochas sedimentares.

Dando sequência ao nosso estudo tratamos os nos dados pelo método que denominamos método da resultante úni ca.

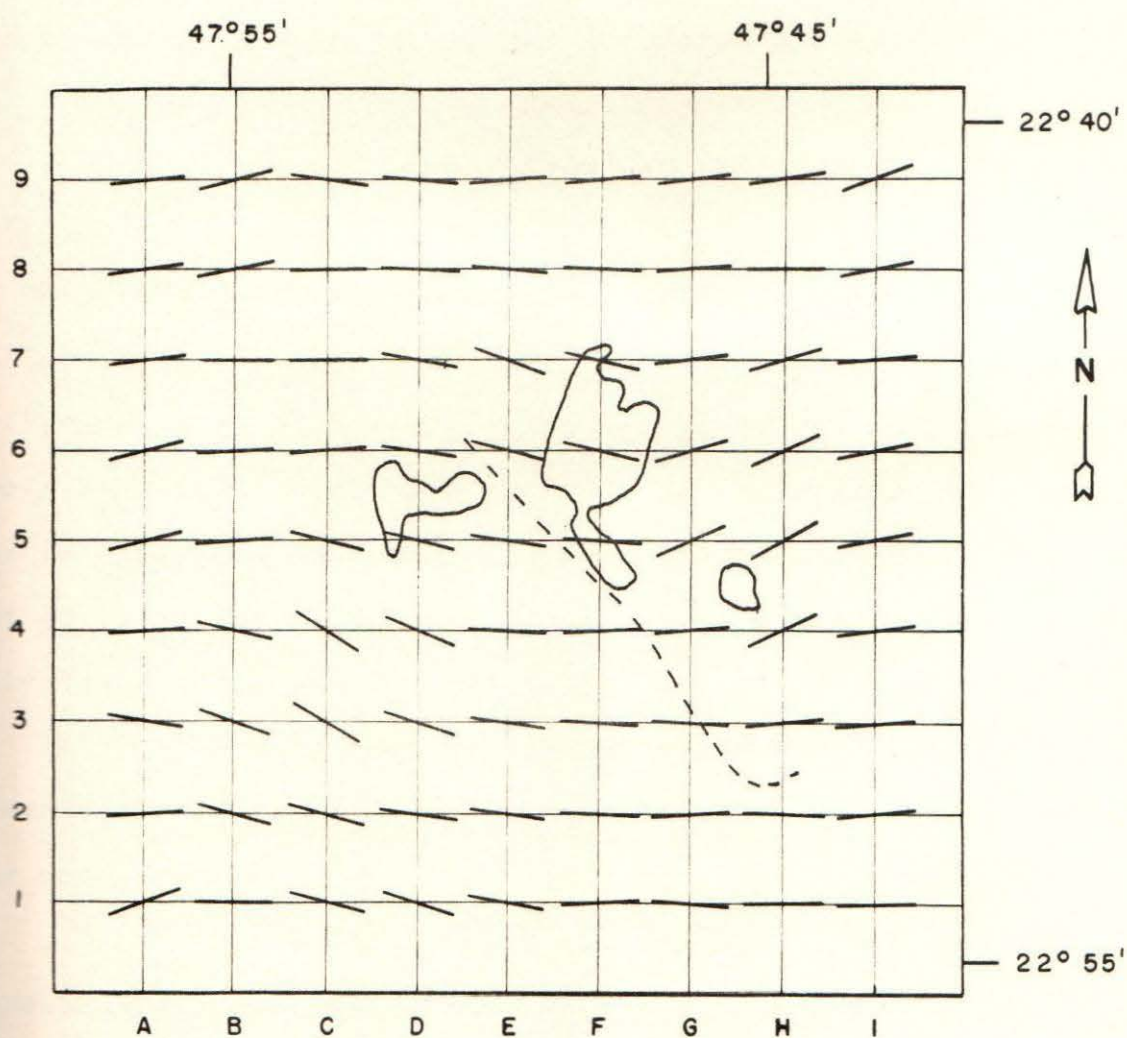
5.2.2.2 - MÉTODO DA RESULTANTE ÚNICA

A metodologia seguida nesse processo é a mesma de Krumbein (1939) e Pincus (1956) com a diferença de que os azimutes não foram duplicados. A razão de não se duplicar os an gulos se deve ao fato já explicado de que a dispersão é muito afetada por esta duplicação, de forma que os azimutes médios das celas apresentam sempre seus módulos com valores menores do que os reais. Embora reconhecendo que a não duplicação dos azimutes acarreta erro ao processo, quizemos testar o método sem falsear os resultados apresentados pelos módulos e sua respectiva dispersão.

O mapa dos azimutes médios segundo este método está representado na fig. 10.

Observa-se neste mapa um padrão normal de fratu mento ao longo da direção ESTE-OESTE. Ao redor da parte cen

MAPA DOS AZIMUTES MÉDIOS
MÉTODO DA RESULTANTE ÚNICA



ESCALA :



FIG. 10

tral do mapa, onde está localizada a Estrutura do Pau D'Alho, verifica-se que há uma sensível perturbação com direção de fraturamento NE no setor nordeste da estrutura e uma direção NW no setor sudoeste do mapa. Dessas observações conclui-se que o método é relativamente sensível para a detecção de perturbações tectônicas em áreas sedimentares.

Após a utilização deste método foi nosso intuito testar um novo processo que abordaremos a seguir :

5.2.2.3 - MÉTODO DAS RESULTANTES PARCIAIS

Esta análise estatística é feita de maneira si milar ao método anterior, porém com uma diferença fundamental : os azimutes de cada cela, foram agrupados em dois conjuntos : maiores que 90° e menores que 90° . Foi calculado um azimute médio para cada um dos grupos e em seguida, a partir dos dois azimutes médios parciais, calculou-se o azimute médio da cela, obedecendo-se a seguinte regra, de acordo com a fig. 11:

No caso B1, em que o ângulo formado pelas duas resultantes é menor que 90° , calcula-se normalmente a resultante média final.

No caso B2, em que o ângulo formado entre as resultantes parciais é maior do que 90° , o cálculo é feito invertendo-se a direção de uma das resultantes parciais.

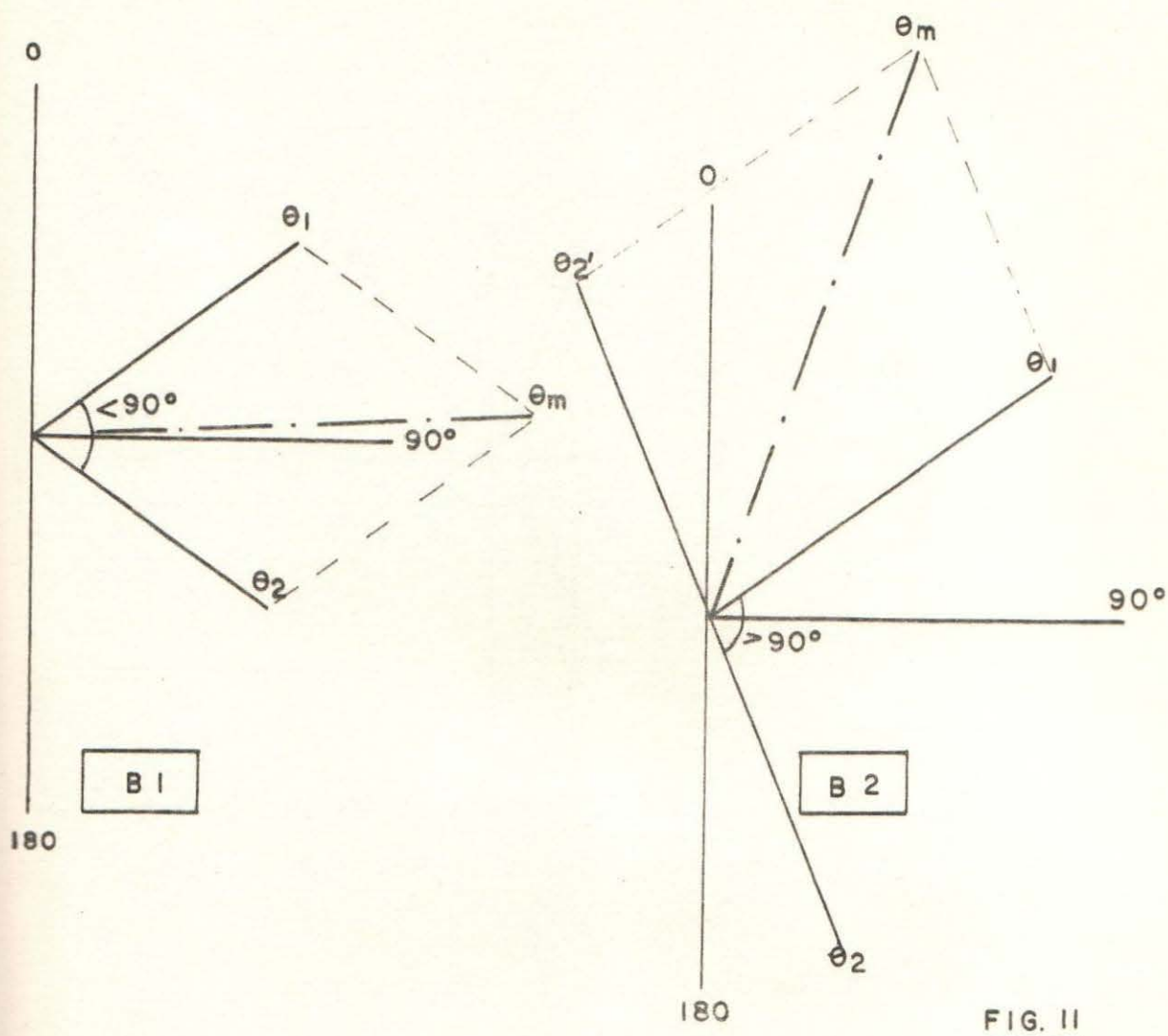


FIG. II

Obtenção de θ_m pelo método das resultantes parciais.

A explicação para esse procedimento é que a resultante final calculada pelo ângulo agudo tem um significado geológico maior, devido sua dispersão ser menor. Como se percebe na fig. 12, a resultante R_1 é bem mais consistente do que a resultante R_2 pois há uma maior concentração de fraturas em torno da linha NS, com pequena dispersão.

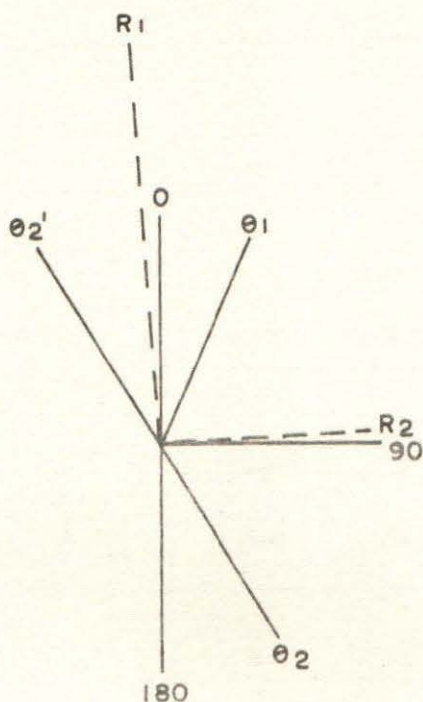


FIG. 12

Variação da dispersão no cálculo do azimute médio - Método das resultantes parciais.

Os resultados desse método são apresentados no mapa de azimutes médios da fig. 13.

Este mapa apresenta um padrão normal de fraturamento ESTE-OESTE, sendo que a área perturbada é aqui mostrada de uma maneira muito clara com um padrão anômalo de direção NW no setor sudoeste e um outro padrão anômalo de direção NE no setor nordeste do mapa. Observa-se ainda um padrão de fraturamento Norte-Sul na porção Sul da área e que passa pelo centro da estrutura dividindo a área perturbada em dois sistemas de fraturamento.

É interessante notar que os resultados observados segundo esse processo são muito semelhantes aos vistos no processo anterior, método da resultante única.

MAPA DOS AZIMUTES MÉDIOS
MÉTODO DAS RESULTANTES PARCIAIS

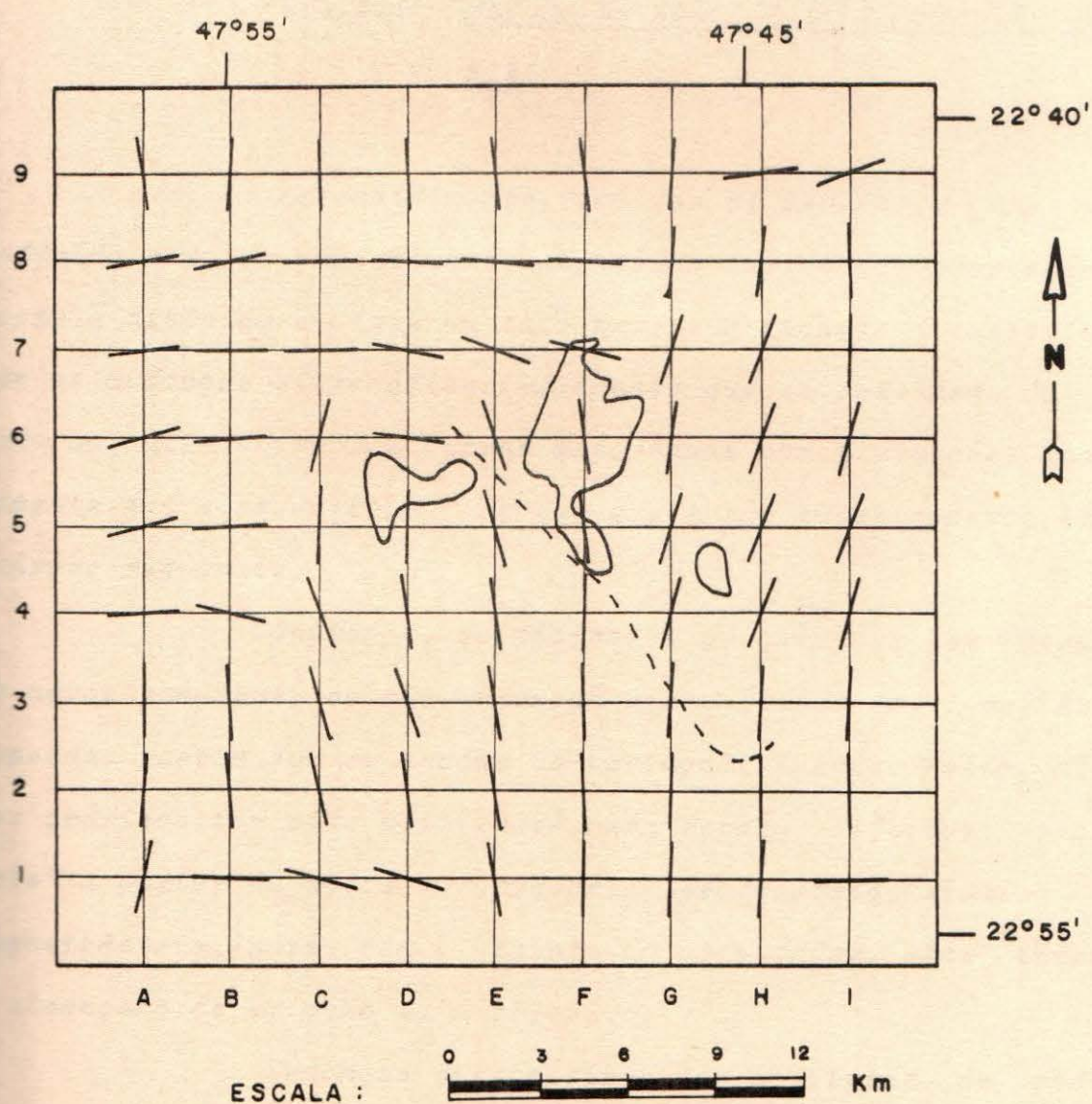


FIG. 13

Após termos realizado o estudo de fraturas de drenagem e relevo da Estrutura do Pau D'Alho pelos três métodos já citados e verificando que os mesmos, apesar de serem sensíveis às perturbações ocorrentes na área da estrutura, são métodos visuais que permitem somente análises subjetivas que, inclusive, podem se modificar de analista para analista, resolvemos aplicar o método da análise de Tendência Vetorial.

5.2.2.4 - MÉTODO DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA VETORIAL

Essencialmente, análise de tendência pode ser definida como um procedimento através o qual cada observação mapeada é dividida em duas ou mais partes : algumas associadas com as mudanças sistemáticas regionais que se estendem de um lado ao outro do mapa e outras associadas com flutuações aparentemente não sistemáticas, locais, que estão superimpostas sobre padrões regionais.

Geólogos, geofísicos e geoquímicos tem procurado novos caminhos, em que mudanças sistemáticas em variáveis mapeadas possam ser separadas de variações locais. Assim, métodos gráficos tem sido utilizados para separar "efeitos regionais" a partir de dados observados em gravimetria, sísmica e magnetometria, porém com o advento do computador, este intento é alcançado de um modo mais objetivo.

Mudanças sistemáticas nos atributos de rochas expostas ao longo de afloramentos ou sobre a área de um mapa são comuns. A espessura de uma unidade estratigráfica, sua com

posição litológica e conteúdo fossilífero, os fluídos que ocupam seus poros, podem ser exemplos que mostram tais variações. Desse mesmo modo, a composição química e mineralógica de corpos de rochas ígneas mostram também tais variações e os processos geológicos que ocorrem em ambientes sedimentares podem mudar sistematicamente de um local do ambiente para outro. Dados geofísicos também mostram tais variações em área. Todas essas situações, porém, dizem respeito a valores lineares e sobre o assunto diversos trabalhos tem sido já escritos. No nosso caso, em que as medidas eram de caráter angular, tivemos que adaptar a metodologia à situação existente.

A maioria dos métodos de análise de tendência envolvem superfícies polinomiais para os dados do mapa, de modo a ser considerada uma técnica de modelos lineares de mínimos quadrados (Krumbein e Graybill, 1965).

A análise de tendência, como é utilizada pelos geólogos, tem invariavelmente envolvida a escolha de superfícies de tendência que satisfaçam o critério dos mínimos quadrados. Isto resulta em superfícies de tendência passando através, acima ou abaixo de cada ponto de dados existentes. A diferença entre os valores computados da superfície de tendência em um ponto e o valor da superfície observada atual daquele ponto é chamada o valor residual (ou valor desvio). Satisfazendo-se o critério dos mínimos quadrados, a soma dos quadrados dos resíduos deve ser minimizada.

Se a superfície de tendência é tida como a componente regional, então o valor residual pode ser considerado como sendo a componente local. A remoção da tendência tem o e-

feito de isolar e enfatizar os componentes locais representados pelos valores residuais.

O critério dos mínimos quadrados pode ser ilustrado pelo problema de traçar uma linha reta para valores observados de duas variáveis que foram plotadas como pontos em um diagrama tridimensional. Uma linha representando a tendência geral dos valores pode ser traçada visualmente, mas isto não é inteiramente objetivo porque uma pessoa poderá traçar a linha diferentemente de outra pessoa. O problema é obter o melhor traçado, usando-se o processo arbitrário dos mínimos quadrados que pode ser definido como :

$$\Sigma (X_{obs.} - X_{tend})^2 = \text{mínimo, onde}$$

X_{obs} são os valores observados, e

X_{tend} são os valores da superfície de tendência que correspondem àqueles pontos dados.

Se adotarmos o critério dos mínimos quadrados deve-se ter em mente que o melhor traçado será aquele que apresentar o menor valor para a somatória dos mínimos quadrados. Pode ser mostrado que somente existe uma única posição, para uma reta que resulta de uma somatória dos desvios quadrados de valor mínimo.

Na figura 14 a linha de tendência foi desenhada de tal maneira que os desvios de Y em relação a X (mostrado nas linhas verticais) foi minimizado. O critério dos mínimos

quadrados pode ser também aplicado para superfícies (fig. 15) e também para hipersuperfícies.

As funções de tendência são descritas por equações. Assim, a linha reta é representada pela equação :

$$Y = A + BX, \text{ onde}$$

X e Y são variáveis e A e B são constantes. Nessa equação Y é a dependente variável, A é o valor de intercepção da linha sobre o eixo Y e o coeficiente B representa a declividade da linha.

Traçando-se uma linha reta pelos mínimos quadrados, o problema se resume em calcular os valores de A e B de tal maneira que a somatória dos desvios quadrados seja o menor possível. Traçando-se linhas curvas, superfícies ou hipersuperfícies por este método o objetivo é obter-se os coeficientes das equações de tal maneira que a referida somatória seja minimizada.

O grau da equação polinomial contendo uma variável dependente e uma independente é designado pelo máximo valor de seus expoentes.

Dessa maneira, uma polinomial de segundo grau pode ser escrita desta maneira :

$$Y = A + BX + CX^2,$$

em que X e Y são variáveis, e A , B e C são coeficientes. Igualmente a equação de terceiro grau envolvendo duas variáveis é igual a

$$Y = A + BX + CX^2 + DX^3.$$

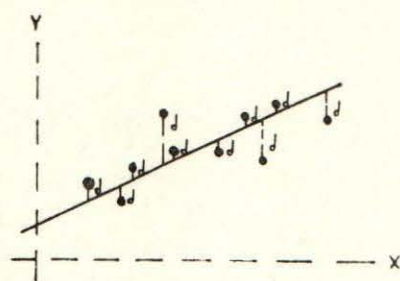


FIG. 14

Traçado de uma reta por pontos de um gráfico pelo método dos mínimos quadrados. A soma dos quadrados dos resíduos (d) em relação ao eixo do X deve ser minimizada. (Seg. Harbaugh e Merriam, 1968)

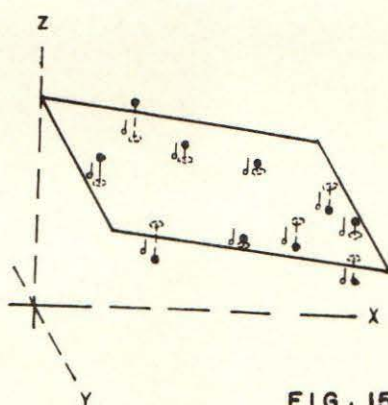


FIG. 15

Traçado de um plano, por pontos de um gráfico de 3 variáveis pelo método dos mínimos quadrados. (Seg. Harbaugh e Merriam, 1968)

A fig. 16 apresenta uma série de equações e seus gráficos nos quais o grau é colocado nas colunas e o número de variáveis por linhas. Por exemplo, em equações de primeiro grau, duas variáveis tornam-se uma linha reta, três variáveis um plano, e quatro variáveis uma hipersuperfície de 1º grau.

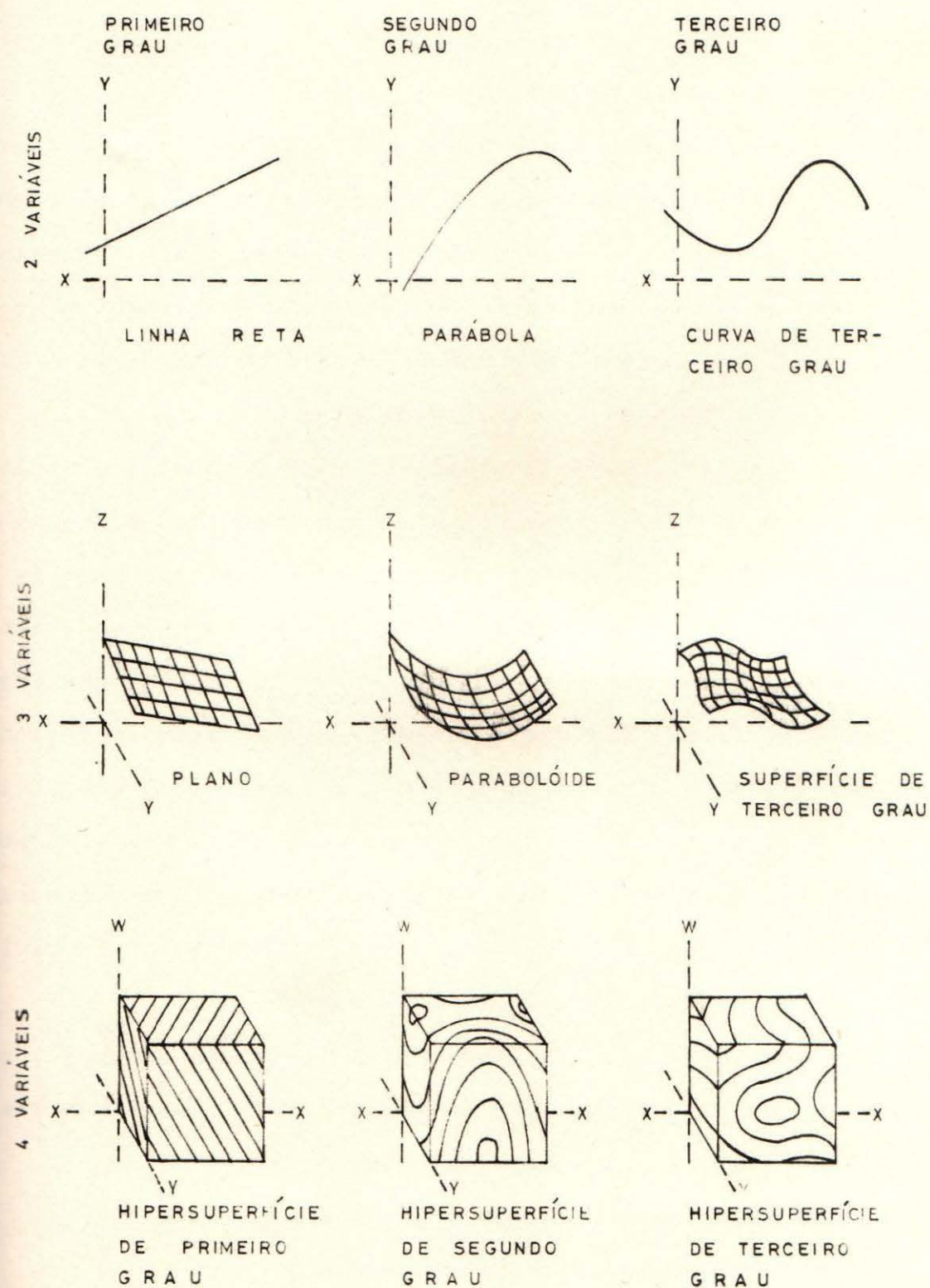
No presente trabalho foi admitida uma equação a três variáveis, cujos graus variavam de 1º ao 5º grau.

Para o cálculo dos coeficientes das equações pelo método dos mínimos quadrados emprega-se análise matricial, inclusive com inversão de matrizes.

Critérios para selecionar o grau mais apropriado de uma superfície de tendência depende dos objetivos geológicos. Se o objetivo é distinguir relações complexas, uma função de tendência de valor relativamente alto é requerida. Se, entretanto, a intenção é distinguir tendências gerais em dados complexos, uma superfície de tendência de baixo grau pode ser desejável (Harbaugh e Merriam, 1968).

Utilizamos de um programa originalmente escrito por Fox (1957), e que foi posteriormente adaptado por Jair Alves Barbosa, bolsista da Fapesp, para ser usado em Computador IBM 1130, com 32 K de memória. O programa, intitulado "Análise de Tendência Vetorial", escrito em Fortran IV, foi processado no computador DIGITAL PDP-10 da Universidade Estadual de Campinas.

Basicamente esse programa usa polinômios ortogonais, análise matricial e mínimos quadrados como técnica na análise de superfícies de dados direcionais. A utilização de poli



(S e g. HARBAUGH • MERRIAM, 1968)

FIG. 16

nômios requer que os dados sejam dispostos em celas pertencentes a uma grade.

Quando isto não ocorre devem ser usados polinômios não ortogonais. Cosenos diretores são utilizados para cada cela da grade no cálculo do vetor azimuth médio, ângulo de mergulho médio, comprimento do vetor resultante e o raio esférico do círculo de confiança do vetor resultante calculado para 5% e 1% de probabilidade, denominado θ .

Superfícies lineares, quadráticas, cúbicas, quárticas e quínticas, através polinômios ortogonais, são computadas e plotadas como mapas de tendência vetorial e de isoazimutes para auxiliar na interpretação dos dados. Mapas de resíduos das superfícies também são úteis na visualização das anomalias das superfícies plotadas. No presente estudo não foram utilizados dados referentes a mergulho, uma vez que as fraturas foram tratadas como linhas e não como planos. Esse método difere basicamente dos métodos anteriores, no que concerne ao cálculo dos azimutes médios por considerar todas as fraturas como tendo módulos unitários.

O mapa dos azimutes médios obtido pela análise de tendência vetorial está representado na fig. 17. Como pode ser observado, três diferenças principais se fazem notar :

- a) A área analisada pelo método é ligeiramente menor que as anteriormente estudadas devido a uma limitação técnica do programa da análise de tendência que não permite uma matriz com mais de oito linhas ou colunas.

MAPA DOS AZIMUTES MÉDIOS
MÉTODO DA ANÁLISE DE TENDÊNCIA

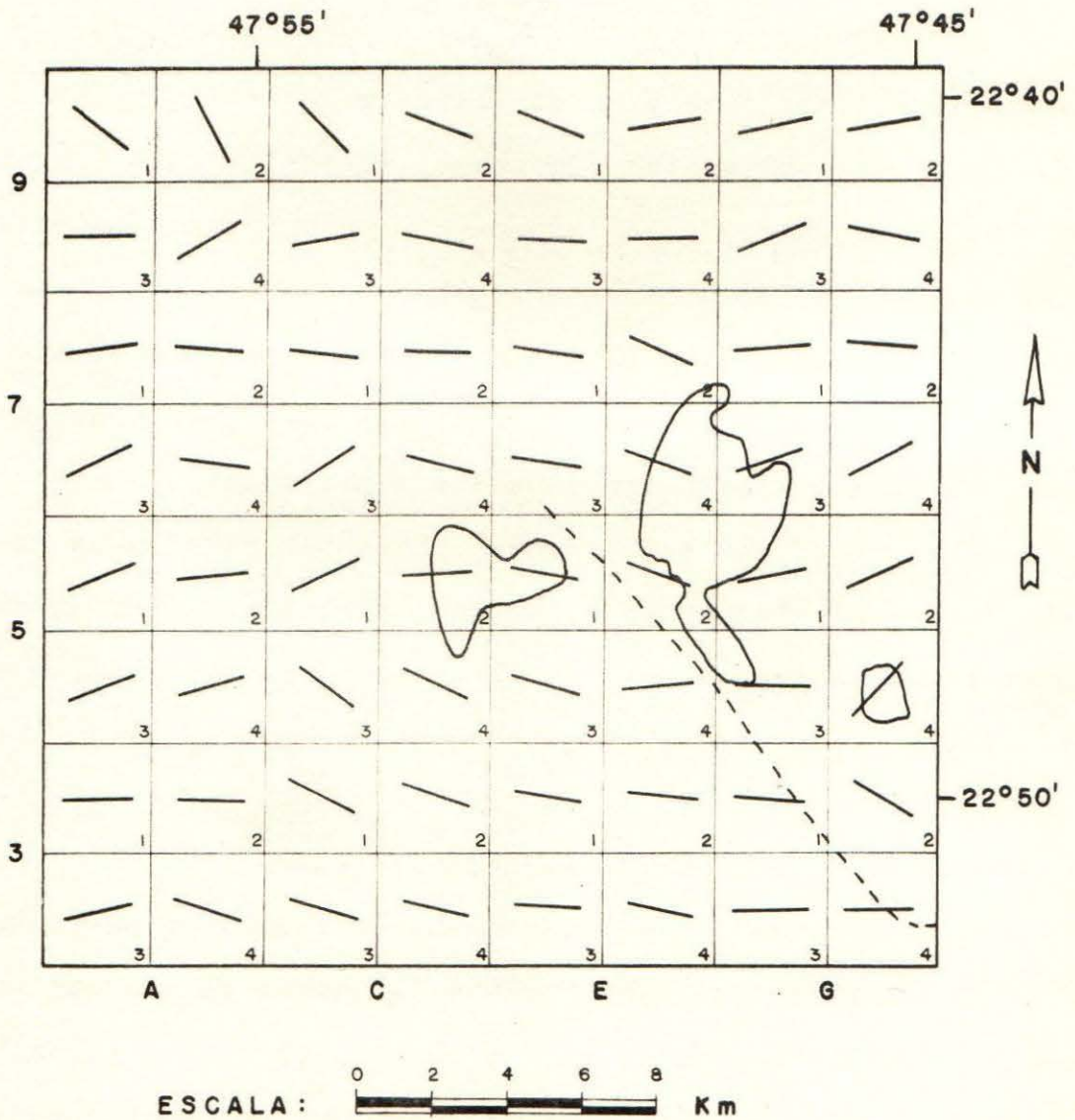


FIG. 17

- b) As celas da grade também não correspondem as mesmas celas dos métodos anteriores. Há uma limitação para que não mais de 50 fraturas sejam analisadas por cela.
- c) Finalmente, não houve sobreposição das celas, sendo que as mesmas são consideradas de uma forma individual.

Esse mapa apresenta um padrão geral de fraturamento de direção ESTE-OESTE, sendo que nas regiões Norte e Sul a perturbação provocada pela elevação da estrutura provocou um desvio das fraturas para uma direção anômala NOROESTE, enquanto que nos setores este e oeste o padrão existente, também anormal, é segundo a direção NORDESTE.

Próximo aos extremos noroeste e oeste do mapa verificam-se valores médios de azimutes que não se enquadram nos padrões acima referidos. A causa desta anormalidade, em nossa opinião, se deve basicamente ao pequeno número de fraturas existentes naquelas celas, que poderiam eventualmente falsear os resultados gerais.

Os dados direcionais de fraturas processados pelo programa de análise de tendência vetorial forneceram resultados, que constam de mapas de tendência de 1º ao 5º grau, além de tendências combinadas, sendo que para cada superfície são fornecidos três mapas :

- a) Mapa de valores da superfície de tendência analisada.
- b) Mapa dos vetores da superfície de tendência analisada.

c) Mapa dos resíduos da superfície de tendência analisada.

Além desses mapas são apresentados três mapas referentes aos azimutes médios, que são : mapa de tendência dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas, mapa dos vetores dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas e mapa residual dos azimutes direcionais médios de cada cela menos o azimute médio total. Todos os resultados listados pelo programa estão representados nas figuras 18 a 23.

Da análise desses resultados, impõe-se a necessidade de verificar-se qual dos mapas de superfície de tendência apresenta valores adequados de acordo com o princípio dos mínimos quadrados. Para isto é necessário que observemos os valores da percentagem de redução da soma total dos quadrados dos mapas de resíduos das superfícies de tendência. O mapa que tiver a maior percentagem de redução será aquele cuja superfície melhor se adapta aos dados apresentados e portanto é o mais adequado.

Em nosso trabalho, foi o mapa de superfície de tendência quadrática (fig. 20 a) que apresentou o maior valor de percentagem de redução na soma dos quadrados, valor este igual a 28,606.

Verifica-se nesse mapa que as isolinhas formam parábolas em torno de um centro com valores aproximadamente E-W, aumentando de valor tanto para Norte como para Sul e diminuindo de valor para Este e Oeste, o que vem corroborar o observado no mapa da fig. 17, isto é, indicando fraturamento NW na parte Nor-

c) Mapa dos resíduos da superfície de tendência analisada.

Além desses mapas são apresentados três mapas referentes aos azimutes médios, que são : mapa de tendência dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas, mapa dos vetores dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas e mapa residual dos azimutes direcionais médios de cada cela menos o azimute médio total. Todos os resultados listados pelo programa estão representados nas figuras 18 a 23.

Da análise desses resultados, impõe-se a necessidade de verificar-se qual dos mapas de superfície de tendência apresenta valores adequados de acordo com o princípio dos mínimos quadrados. Para isto é necessário que observemos os valores da percentagem de redução da soma total dos quadrados dos mapas de resíduos das superfícies de tendência. O mapa que tiver a maior percentagem de redução será aquele cuja superfície melhor se adapta aos dados apresentados e portanto é o mais adequado.

Em nosso trabalho, foi o mapa de superfície de tendência quadrática (fig. 20 a) que apresentou o maior valor de percentagem de redução na soma dos quadrados, valor este igual a 28,606.

Verifica-se nesse mapa que as isolinhas formam parábolas em torno de um centro com valores aproximadamente E-W, aumentando de valor tanto para Norte como para Sul e diminuindo de valor para Este e Oeste, o que vem corroborar o observado no mapa da fig. 17, isto é, indicando fraturamento NW na parte Nor-

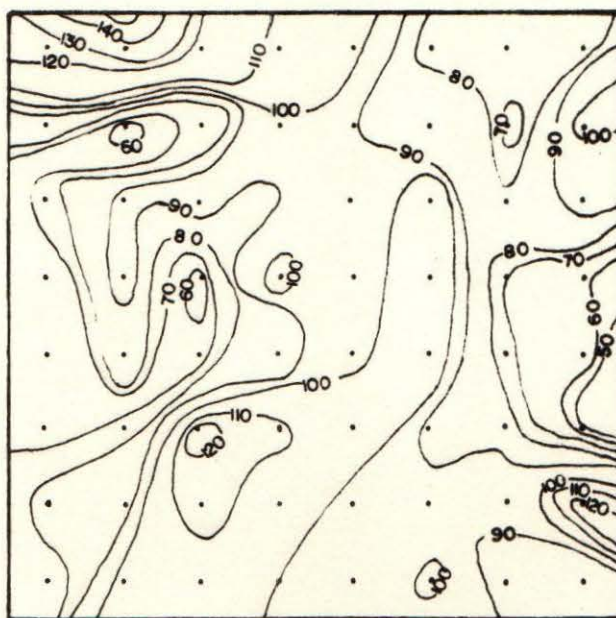


FIG. 18a

Mapa de tendência dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas.

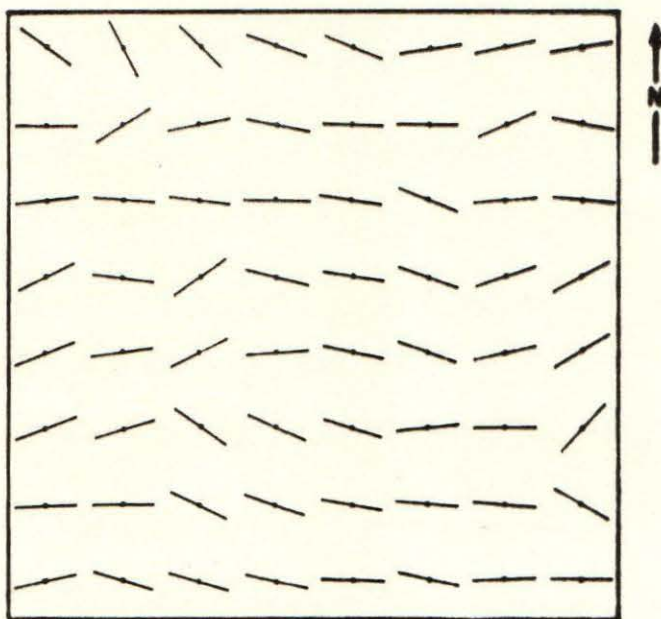


FIG. 18b

Mapa dos vetores dos azimutes direcionais médios em cada cela por linhas e colunas.

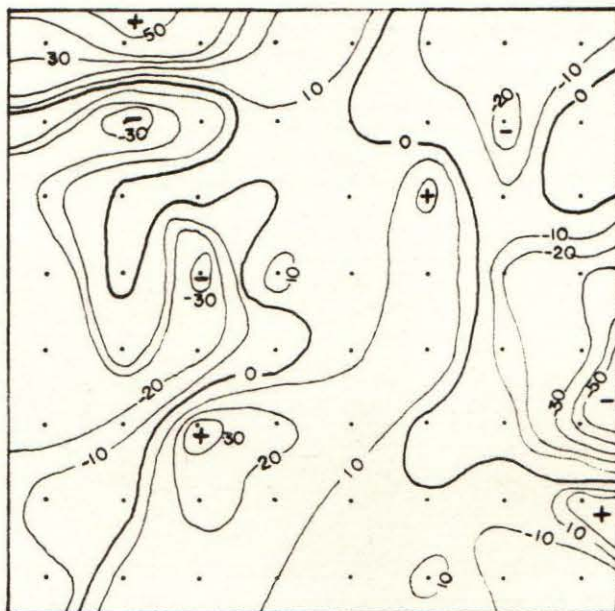


FIG. 18c

Mapa residual dos azimutes direcionais médios
de cada csla menos o azimute médio total.

Soma total dos quadrados = 25.139.

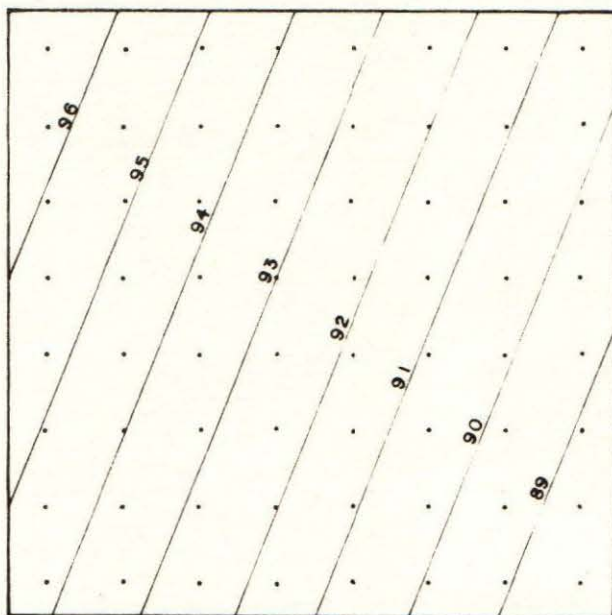


FIG. 19a

Mapa de tendência linear dos azimutes direciona
is.

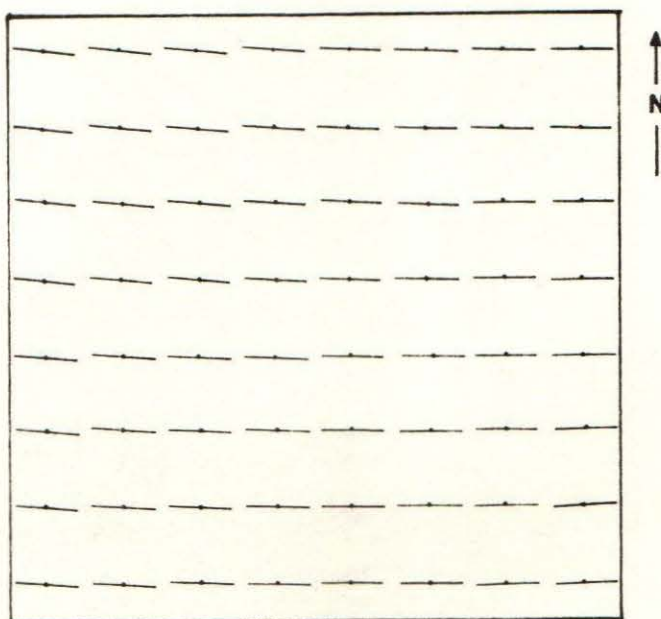


FIG. 19 b

Mapa dos vetores dos azimutes direcionais
Superfície de tendência linear.

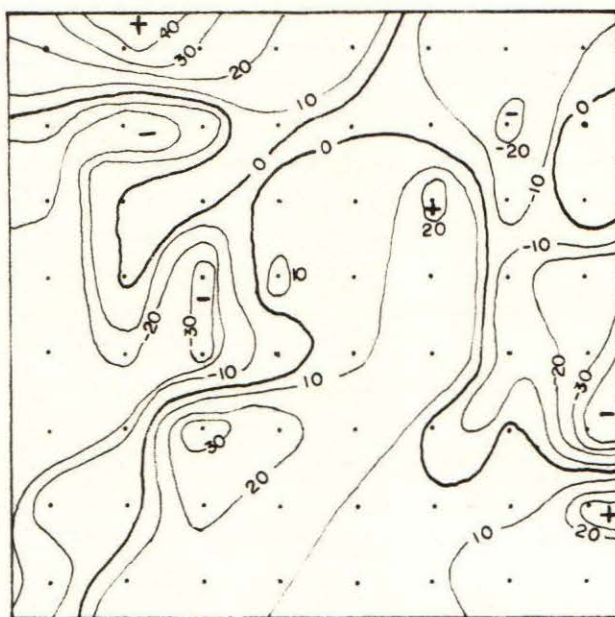


FIG. 19 c

Mapa residual dos azimutes direcionais
Superfície de tendência linear.

Soma dos quadrados do mapa = 24.842.

Porcentagem de redução na soma total dos quadrados = 1,183.

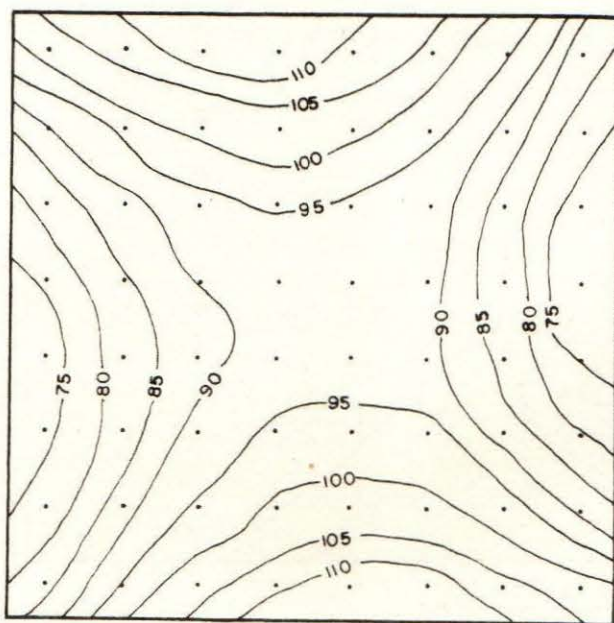


FIG. 20a

Mapa de tendência quadrática dos azimutes dire_ocionais.

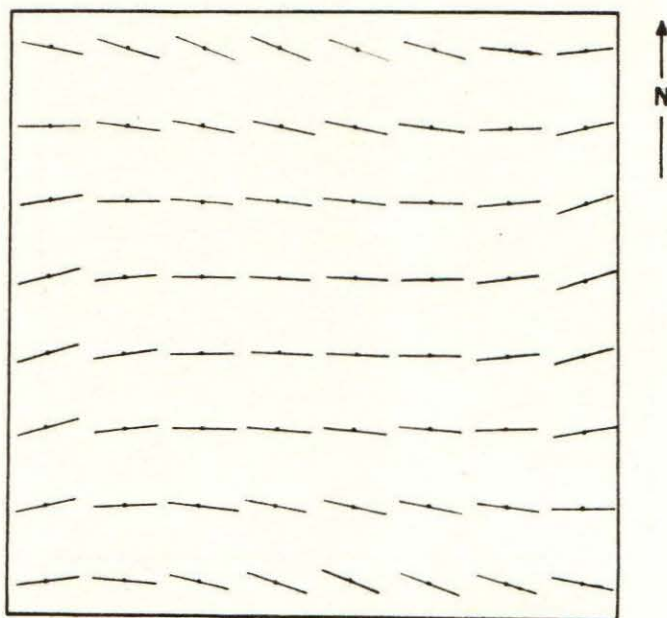


FIG. 20b

Mapa dos vetores dos azimutes direcionais
Superfície de tendência quadrática.

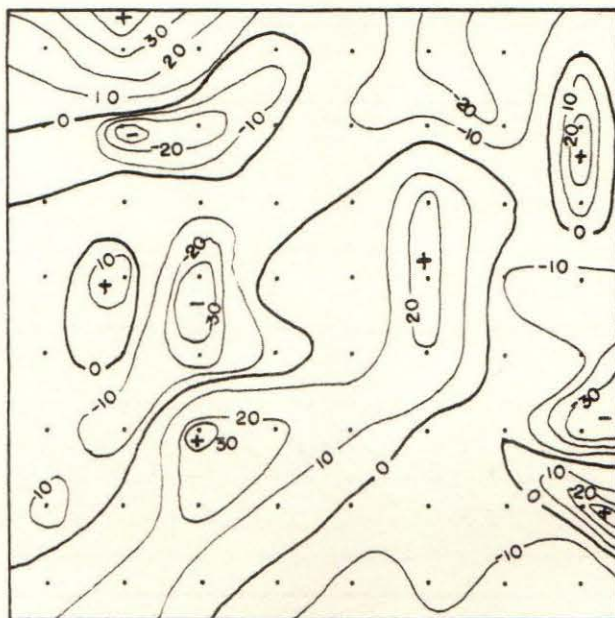


FIG. 20c

Mapa residual dos azimutes direcionais

Superfície de tendência quadrática.

Soma dos quadrados do mapa = 17.948

Porcentagem de redução na soma total dos quadrados = 28,606.

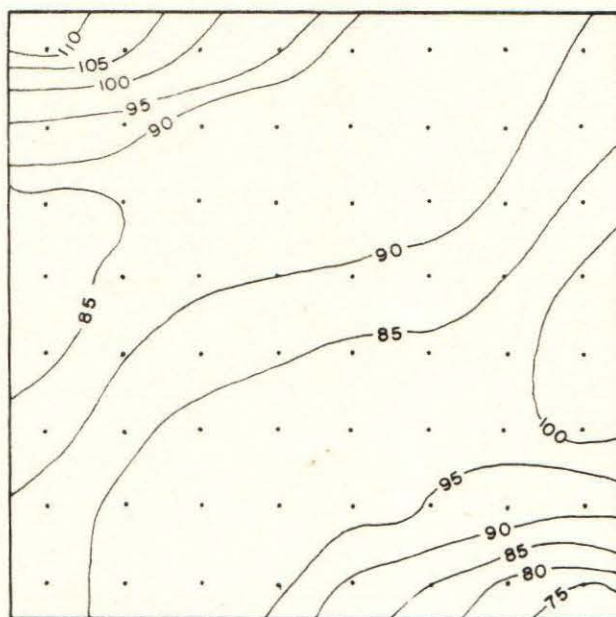


FIG. 21a

Mapa de tendência cúbica dos azimutes di-
recionais.

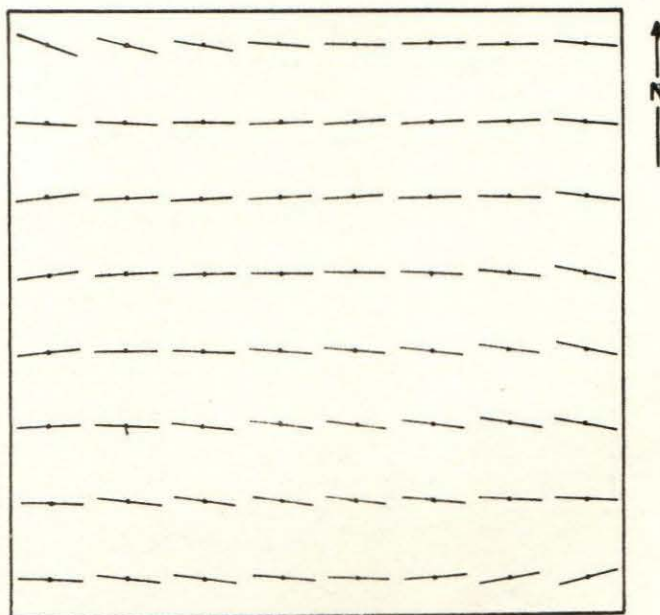


FIG. 21b

Mapa dos vetores dos azimutes direcionais
Superfície de tendência cúbica.

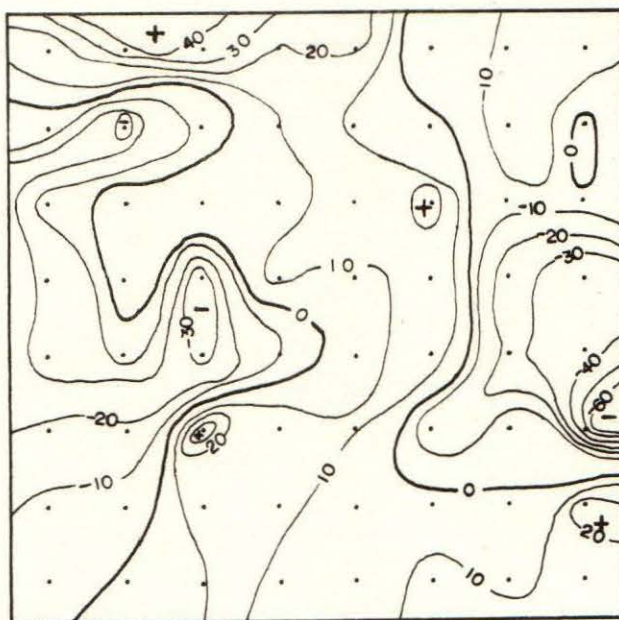


FIG. 21c

Mapa residual dos azimutes direcionais
Superfície de tendência cúbica.

Soma dos quadrados do mapa = 22.875

Porcentagem de redução na soma total dos quadrados = 9,004.

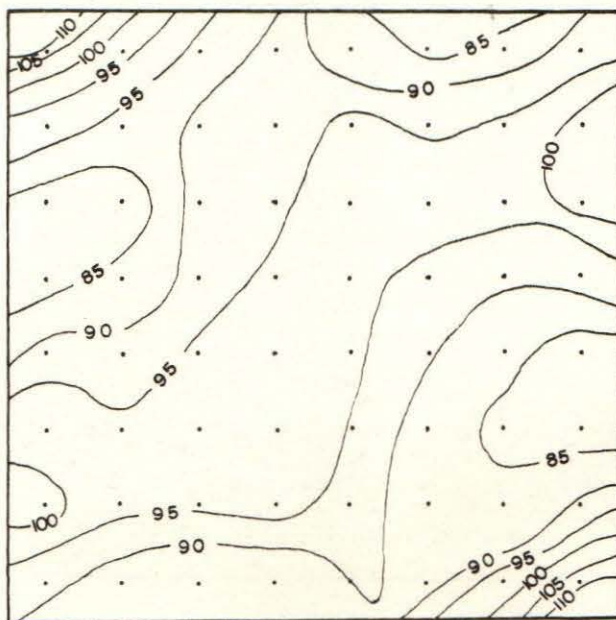


FIG. 22 a

*Mapa de tendência quártica dos azimutes di-
reccionais.*

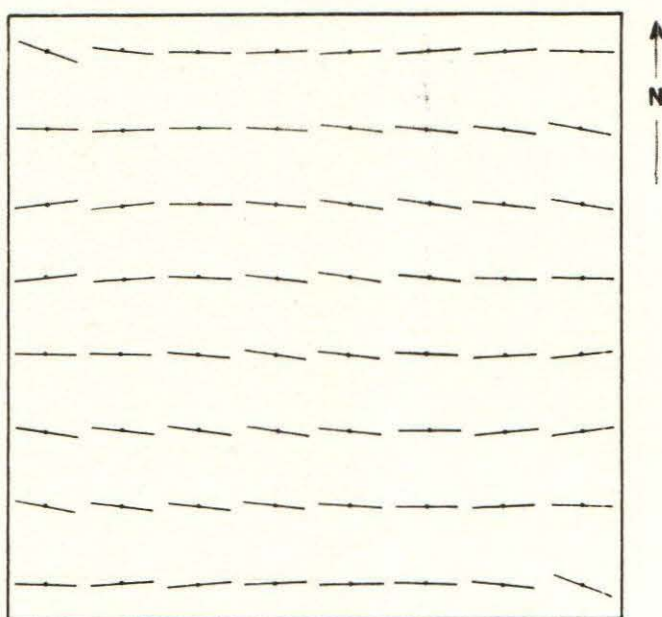


FIG. 22 b

*Mapa dos vetores dos azimutes direccionais
Superfície de tendência quártica.*

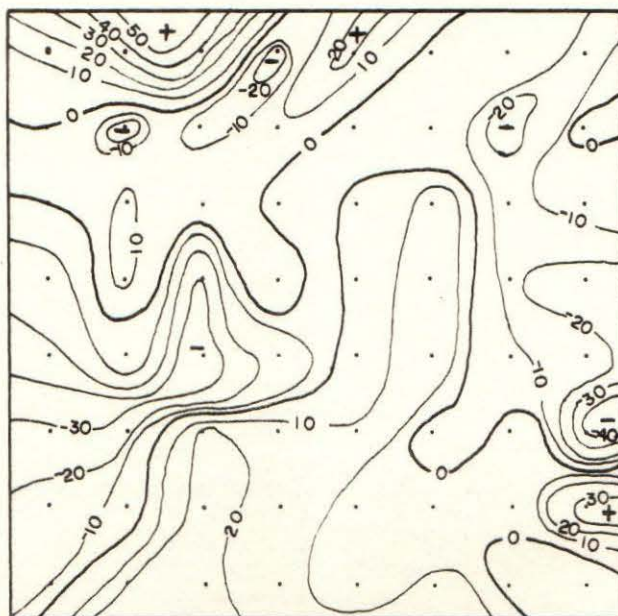


FIG. 22 c

Mapa residual dos azimutes direcionais

Superfície de tendência quártica.

Soma dos quadrados do mapa = 22.877

Porcentagem de redução na soma total dos quadrados = 8,997.

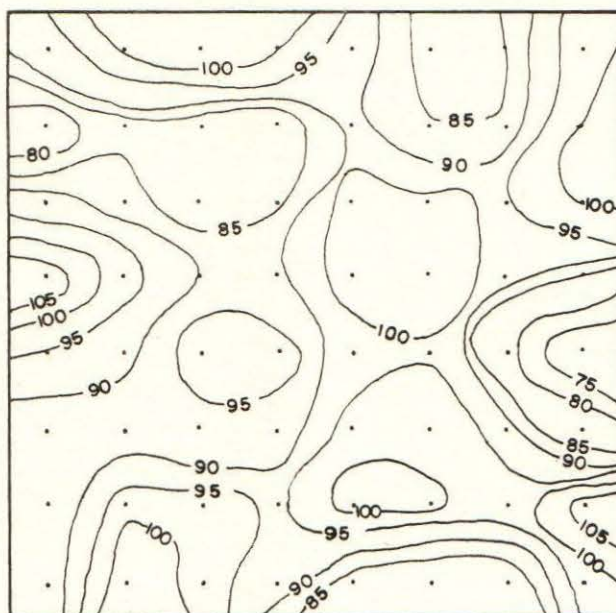


FIG. 23 a

Mapa de tendência quíntica dos azimutes di
recionais.

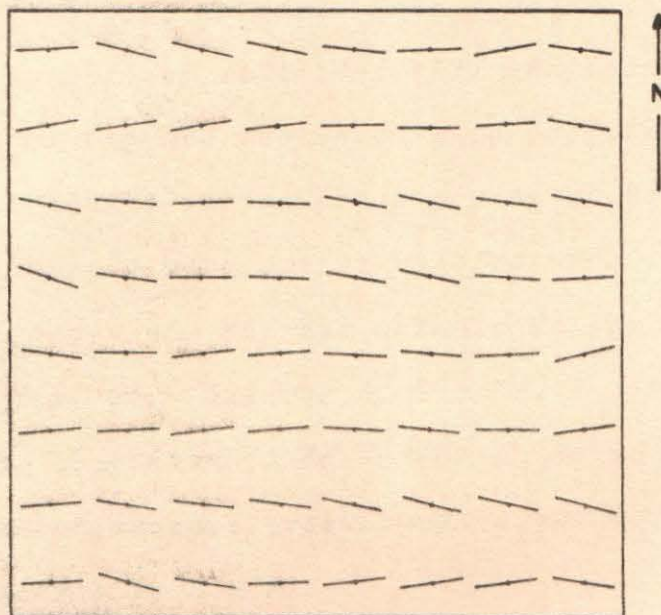


FIG. 23b

Mapa dos vetores dos azimutes direcionais
Superfície de tendência quintica.

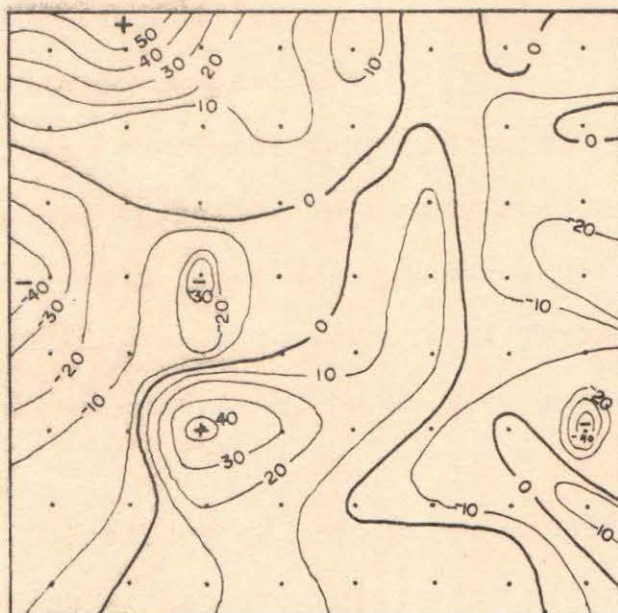


FIG. 23c

Mapa residual dos azimutes direcionais
Superfície de tendência quintica.

Soma dos quadrados do mapa = 21.090

Porcentagem de redução na soma total dos quadrados = 16,107.

te e Sul e fraturamento NE na parte Este e Oeste do mapa.

Northfleet et alli (1971) analisando o comportamento de fraturas de regiões tectonicamente positivas e negativas, chegaram a conclusão que em áreas positivas há uma tendência de se formar sobre o alto estrutural fraturas convergentes que causam modificações nos padrões normais de fraturamento como se observa na fig. 24. (Quadros A, B e C). Em áreas perturbadas negativamente, há tendência de se formar sobre o baixo estrutural fraturas tangenciais, resultando o que é mostrado na mesma figura, (Quadros D, E e F).

Na fig. 25, são mostrados os mapas de azimutes médios, tendência de 29 grau e tendência de 39 grau para estruturas simuladas positivas e negativas.

Da comparação dos resultados obtidos nos mapas de superfície de tendência quadrática (fig. 20 a, b e c) com os resultados de Northfleet, concluiu-se que a área da Estrutura do Pau D'Alho é na realidade um alto estrutural, evidenciado pelos sistemas de fraturas convergentes.

Essa conclusão veio corroborar aquilo que havíamos verificado nos trabalhos de campo, quando foram realizados os perfis geológicos. Além disso, podemos afirmar que a Estrutura do Pau D'Alho é um alto estrutural formado por falhas escalonadas, e não um anticlinal ou um domo como anteriormente suspeitado.

Os estudos de análise de tendência aplicados à áreas cuja tectônica não é bem esclarecida poderão revelar muito claramente estruturas ocultas, que uma vez conhecidas em muito auxiliarão os geólogos tanto no setor acadêmico da Geologia como

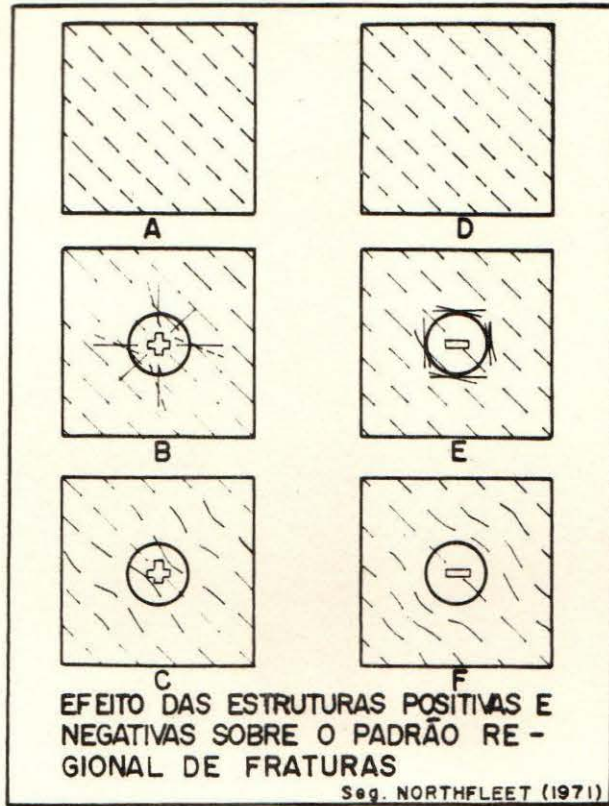


FIG. 24

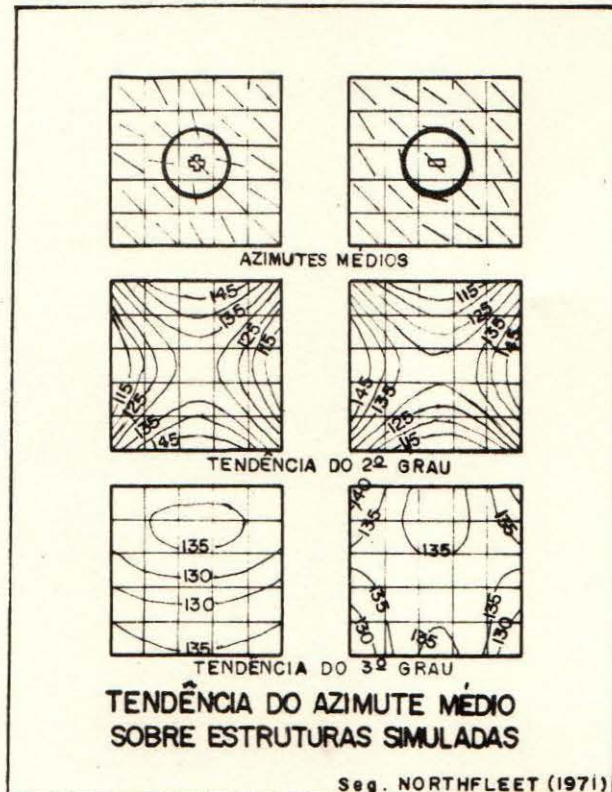


FIG. 25

naquele aplicado à Engenharia.

Como parte final de nossa pesquisa, resolvemos testar todos os métodos anteriores em função da Análise de Tendência. Para isto, utilizamo-nos dos dados direcionais dos mapas de azimutes médios de cada um dos métodos.

O programa utilizado, Análise de Superfícies de Tendência foi processado no computador IBM-1130 da Unicamp, tendo revelado que dos três processos inicialmente usados, o método das resultantes parciais foi o único a mostrar-se com as mesmas características do método da Análise de Tendência Vetorial. Chegamos a esta conclusão pela análise de todos os mapas de superfície de tendência. O mapa de superfície de tendência quadrática do método das resultantes parciais é idêntico ao apresentado pela Análise de Tendência Vetorial na fig. 20 a. Isto mostra que o método das resultantes parciais provavelmente é um processo mais útil na análise de dados direcionais que os métodos da resultante única e da duplicação dos azimutes.

6. GÊNESE DA ESTRUTURA

Em capítulos anteriores referimo-nos a autores que estudando a Estrutura do Pau D'Alho consideraram-na como tendo uma origem proveniente de perturbações tectônicas por dobramento. Estes dobramentos teriam então formado anticlinais ou domos.

Embora existam domos na região, como os de Anhembi e Artemis, este descoberto por Soares (1973), concluímos que o Pau D'Alho é na realidade uma estrutura falhada, constituindo um alto estrutural. Estas falhas são normais, de movimentos verticais e rotacionais, em que os blocos foram adernados (foto 10). Os rejeitos destas falhas normalmente não são grandes, atingindo, como pode ser observado nos perfis geológicos, apenas algumas dezenas de metros.

Estes falhamentos são muitas vezes escalonados fazendo com que os blocos centrais da estrutura, constituídos da Formação Estrada Nova, tenham sido alçados ao nível da Formação Pirambóia. Não foram verificados na área falhas transcorrentes, consideradas como comuns no Estado de São Paulo por Bjornberg (1965 e 1969).

A maioria das estruturas dômicas da região são consideradas por Soares (1973) como tendo se originado por acomodação de camadas superiores em relação a estruturas do tipo "horst", situadas em profundidade. Julgamos que essas estruturas possam ter se formado também por intrusões básicas de profundidade que não atingiram a superfície devido a competência das rochas sobrejacentes, o que impossibilitou a formação de falhas e



Foto 10 - Vista leste das estruturas da área do Pau D'Alho, vendo-se a esquerda e em primeiro plano o Morro do Capitão e a direita, em segundo plano, o Monte Branco. Note-se o basculamento dos dois blocos em sentido inverso. Os blocos não são alinhados, sendo apenas paralelos.

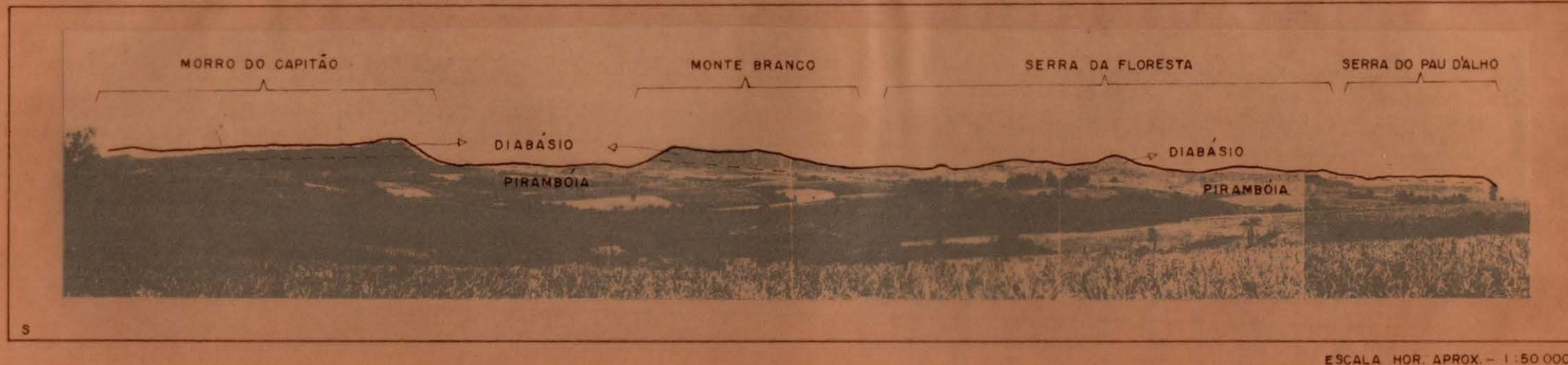
de diques e sills.

No caso particular da Estrutura do Pau D'Alho a atividade magmática está associada aos falhamentos por meio de diques e sills, sendo contemporâneos e de idade mesozóica.

De acordo com os perfis geológicos executados na área e que atravessam a estrutura transversalmente aos falhamentos ficou evidenciado que mesmo que exista uma intrusão em profundidade, a causa principal da formação do alto estrutural e dos basculamentos dos blocos é o sistema de falhas de direção NW. Sabe-se que o poço perfurado no centro da estrutura (vide mapa geológico) depois de atravessar algumas dezenas de metros de rochas sedimentares penetrou 147 metros de diabásio, ocasião em que foi abandonado. Provavelmente foi ele perfurado exatamente ao longo de um dos possantes diques de diabásio aí existentes ou então atingiu a parte superior da intrusão básica.

Um ponto importante a salientar neste trabalho é a inexistência da Formação Botucatu (eólica) e também do basalto na área da estrutura. Os capeamentos de rocha básica que cobrem os morros da área, como a Serra da Fortaleza, Serra do Pau D'Alho, Serra da Floresta, Morro do Capitão, Morro Chato e Monte Branco mostraram, nos estudos de campo, tratar-se na realidade de sills de diabásio que jazem diretamente sobre a Formação Pirambóia e não basalto cobrindo a Formação Botucatu como anteriormente descrito (foto 11).

Para a formação destes corpos magmáticos idealizou-se um sistema de injeção que inicialmente formaria os diques em profundidades maiores, os quais preencheriam as falhas e fraturas e mais próximo à superfície, devido a descompressão causa



ESCALA HOR. APROX. - 1:50 000

Foto 11 - Vista geral este da Estrutura do Pau D'Alho, salientando-se os basculamentos e o capeamento de diabásio sobre a Formação Pirambóia.

da pelo menor peso das camadas geológicas, haveria possibilidade da intrusão de corpos concordantes, inclusive com espessuras maiores do que no caso dos diques.

Com a erosão, houve uma inversão do relevo pois os blocos rebaixados, protegidos pelo capeamento de diabásio, permaneceram como altos topográficos e morros testemunhos (foto 11) enquanto que os blocos alçados, de constituição litológica mais frágil foram erodidos e rebaixados topograficamente.

Consideramos portanto a Estrutura do Pau D'Alho uma situação "sui generis" dentro da estratigrafia da Bacia Sedimentar do Paraná e esperamos que esse estudo possa contribuir para um melhor conhecimento sobre a geotectônica da Bacia.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho, de cunho eminentemente tectônico, teve como um dos seus objetivos principais procurar elucidar a gênese e os mecanismos que possibilitaram a formação da Estrutura do Pau D'Alho.

Através estudos de fotointerpretação e dos perfis geológicos chegou-se as seguintes conclusões :

- a) A Estrutura do Pau D'Alho não é um domo ou anticlinal, mas um alto estrutural.
- b) A causa principal da estrutura é um sistema de falhas normais que gerou os deslocamentos e basculamentos dos blocos.
- c) Não existe na região da estrutura a Formação Botucatu (eólica) nem o basalto da Formação Serra Geral, ocorrentes somente no extremo noroeste da área mapeada.
- d) Aos falhamentos que possuem direção geral N40W, estão associados diques e sills de diabásio formados contemporaneamente. A idade dessas intrusões e dos falhamentos é mesozóica.
- e) Houve uma inversão de relevo causada pelo capamento de diabásio que protege os blocos rebaixados da erosão dominante na área.
- f) No interior da estrutura, a Formação Estrada Nova, que constitui a parte superior do bloco alçado, foi metamorfisada pelo diabásio,

sendo silicificada.

- g) Pelas suas características, a Estrutura do Pau D'Alho não tem similaridade com outras estruturas da região, as quais são predominantemente de caráter dômico.

Na segunda parte de nosso trabalho, cujo objetivo foi testar a aplicação de métodos estatísticos no estudo de fraturas de relevo e drenagem obtidas a partir de fotointerpretação, com a finalidade de descobrir, sem estudos de campo, estruturas de caráter positivo ou negativo, chegamos as seguintes conclusões :

- a) Partindo-se do conhecimento do caráter positivo da Estrutura do Pau D'Alho e utilizando fraturas obtidas em fotografias aéreas, o emprego de vários métodos de análise levou-nos a conclusão de que o método da Análise de Tendência Vetorial é o mais adequado para o tratamento de dados direcionais.
- b) O método da Análise de Tendência Vetorial apresenta muitas vantagens sobre os procedimentos geológicos normais, entre eles a economia de tempo e a possibilidade de se efetuar trabalhos em regiões de difícil acesso ou de afloramentos escassos.
- c) Embora tratando-se ainda de resultados que precisam de maiores confirmações, principalmente em áreas de baixos estruturais, ainda

não testadas, somos de opinião que essa metodologia é um passo importante dentro do campo da Geologia Aplicada à Engenharia, campo onde militamos, pelas implicações que existem normalmente entre grandes obras de Engenharia e o substrato rochoso.

8. BIBLIOGRAFIA

- Almeida, F.F.M. e Barbosa, O. (1949) - A Série Tubarão na Bacia do Rio Tietê, Estado de São Paulo. D.N.P.M. Div. de Geol. e Miner. - Notas Preliminares nº 48.
- Almeida, F.F.M. e Barbosa, O. (1953) - Geologia das Quadrículas de Piracicaba e Rio Claro, Estado de São Paulo. Bol. nº 143 da D.G.M. Departamento Nacional da Produção Mineral. Rio de Janeiro.
- Almeida, F.F.M. et Alli (1964) - Geologia do Estado de São Paulo - Bol. nº 41 do Instituto Geográfico e Geológico - São Paulo.
- Andrade, S.M. e Soares, P.C. (1971) - Mapa Geológico da Região Centro-Leste de São Paulo - Relatório DESUL nº 407. Ponta Grossa, PR.
- Barbosa, O. e Gomes, F.A. (1958) - Pesquisa de Petróleo na Bacia do Rio Corumbataí, Estado de São Paulo. D.N.P.M. D.G.M., Bol. nº 171.
- Bjornberg, Alfredo J.S. (1965) - Sedimentos Pós-Cretácicos do Leste do Estado de São Paulo - Tese para Concurso de Livre Docência - São Carlos.
- Bjornberg, Alfredo J.S. (1969) - Contribuição ao Estudo do Cenozóico Paulista : Tectônica e Sedimentologia - Tese apresentada para provimento do cargo de Professor Titular - São Carlos.
- Bósio, Nivaldo (1973) - Geologia da Região de São Pedro. Tese de Doutorado. (Inédito). Rio Claro.

- Curry, J.R. (1955) - *The Analysis of Two-dimensional Orientation Data*, *Journal of Geology*, 64 pp. 117 - 131, Illinois.
- Curry, J.R. (1956) - *Dimensional Grain Orientation Studies of Recent Coastal Sands* : American Assoc. Petroleum Geologists Bull., vol. 40 n° 10, pp. 2440-2456.
- Deffontaines, P. (1935) - *Regiões e Paisagens do Estado de São Paulo. Primeiro Esboço de Divisão Regional. Geografia*, vol. 1, fascículo 2 - pp. 117-169. São Paulo.
- Felicíssimo, Jesuino (1952) - *Histórico das Pesquisas de Petróleo no Estado de São Paulo*. Bol. 3 e 4, vol. X da revista IGG, pp. 262-278. São Paulo.
- Fox, William T. (1967) - *Fortran IV Program for Vector Trend Analyses of Directional Data*. Computer Contribution 11, State Geological Survey, The University of Kansas, Lawrence.
- Fulfaro, Vicente José (1967) - *Contribuição à Geologia da Região de Angatuba*. Bol. n° 253 da D.G.M. Departamento Nacional da Produção Mineral. Rio de Janeiro.
- Harbaugh, J.W. e Merriam, D.F. (1968) - *Computer Applications in Stratigraphic Analysis* - John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Jones, T.A. (1967) - *Estimation and Testing Procedures for Circular Normally Distributed Data* : Office Naval Research, Geography Branch, Tech. Rept. n° 3, ONR Task n° 388-078, 61 pp.

- Krumbein, W.C. (1939) - Preferred Orientation of Pebbles in Sedimentary Deposits. Bol. nº 7, Vol. XLVII - Journal of Geology.
- Landim, P.M.B. (1970) - O Grupo Passa Dois (P) na Bacia do rio Corumbataí (SP) Bol. nº 252 da D.G.M. Departamento Nacional da Produção Mineral. Rio de Janeiro.
- Krumbein, W.C. e Graybill, F.A. (1965) - An Introduction to Statistical Models in Geology - Mc Graw Hill.
- Mezzalana, S. (1965) - Descrição Geológica e Geográfica das Fôlhas de Piracicaba e São Carlos, São Paulo. Bol. 43 do IGG S.P.
- Moraes Rego, L.F. (1945) - Nota sobre a Localização de uma Sonda gem no Estado de São Paulo. Bol nº 1 da revista "Geologia e Metalurgia" da USP - São Paulo.
- Northfleet, A.A. et alli (1971) - Aplicação de Geomatemática à Prospeção de Petróleo - Análise de Fraturas por Polinômios Ortogonais. Boletim dos Anais do XXV Congresso Brasileiro de Geologia, Vol. 3. São Paulo.
- Paula, Iclêa da Rocha (1972) - Geomorfologia da Região do Pau D'Alho no Interflúvio dos Rios Piracicaba e Tietê. Relatório de pesquisa para a Fapesp - Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras de Rio Claro, São Paulo.
- Pincus, H.J. (1956) - Some Vector and Arithmetic Operations on Two Dimensional Orientation Variates, With Applications to Geological Data. Bol. nº 6, Vol. 64 - Journal of Geology.

- Soares, P.C. (1973) - *O Mesozóico Gonduânico no Estado de São Paulo - Tese de Doutorado - (Inédito).* Rio Claro.
- Steinmetz, R. (1962) - *Analysis of Vectorial Data. Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 32, pp. 801 - 812.
- Washburne, C.W. (1930) - *Petroleum Geology of the State of São Paulo. Com. Geol. Geogr., Bol. nº 22, 272 pp.* São Paulo.

Unidade FEL

Proc

DOAÇÃO

Preço Estimativo:

Cr 23,10

Data 21 / 8 / 87

T	C279c	BAE 8746
AUTOR: CASTRO, PAULO ROBERTO		
MORRA		
TIT	T	
do	C279c	BAE 8746
AUTOR: CASTRO, PAULO ROBERTO		
TÍTULO: Contribuição ao estudo da estrutura do Pau		
Nº	Devolução	Assinatura

TESE BAE 8746

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

SISTEMA DE BIBLIOTECAS

T
C279c

BAE 8746

AUTOR: CASTRO, PAULO ROBERTO

MOURA.

TITULO: Contribuição ao estudo da estrutura do Pau-
da-
160

[illegible]

[illegible]

C279c

BAE 8746

AUTOR: CASTRO, PAULO ROBERTO

TÍTULO: Contribuição ao estudo da estrutura do Pau . . .

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

[illegible]

