

CONTRIBUIÇÃO DA GEOLOGIA ESTRUTURAL À PESQUISA DE
ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ROCHAS FRATURADAS

EDUARDO A. LADEIRA*

RESUMO--Grandes áreas do território brasileiro são constituídas por rochas cristalinas precambrianas, como granitos, gnaisses, vários tipos de xistos e filitos, quartzitos, anfíbolitos e menores proporções de mármore e rochas carbonáticas. Essas rochas, geralmente deformadas polifasicamente, encerram potencialmente significantes volumes de recursos hídricos, que em regiões áridas ou semi-áridas no nordeste do Brasil e de Minas Gerais, constituem a única fonte de água na estação seca. Essas fontes de água subterrâneas em metamorfitos permanecem praticamente inexploradas, parcialmente devido à complexa geologia desses terrenos metamórficos.

Assim, técnicas geológicas diferentes precisam ser usadas para definir os melhores alvos de sondagem visando aqueles recursos hídricos subterrâneos. O presente artigo apresenta a Geologia Estrutural como uma das ferramentas que podem ser aplicadas com sucesso nos estudos exploratórios de água subterrânea, especialmente seus métodos de análise estrutural.

Discutem-se os aspectos de reservatórios fraturados de água subterrânea relacionados a: 1) - zonas de cisalhamento e geometria de falhas transcorrentes e 2) - esquema de padrão de fraturamento em rochas dobradas. Exemplos tirados de estudos de reservatórios fraturados de petróleo são brevemente abordados, porque o autor acredita que muito se pode usufruir da experiência de exploração de petróleo como um todo, e em rochas fraturadas, em particular.

ABSTRACT--Major parts of the Brazilian territory are made up mostly of Precambrian crystalline rocks such as granites, gneisses, various types of schists, phyllites, quartzites, amphibolites, and minor marbles and carbonate rocks. These rocks which are generally polyphased deformed host significant amount of untapped underground water resources, which in arid and semi-arid zones like places of northeastern Brazil and Minas Gerais are the unique sources of water in the dry season. These sources of underground water in metamorphic rocks remain practically unexplored partly due to the complex geology of those metamorphic terrains.

Therefore, different geological techniques have to be used to pinpoint the best drilling targets aiming at

* Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG.

Caixa Postal 2608, CEP 30.000 - Belo Horizonte, MG

underground water. This paper introduces Structural Geology as one of the techniques which can be successfully applied on underground water exploration studies, especially the methods of structural analysis.

Aspects of potential fractured underground water reservoirs related to 1) - shear zones and wrench fault geometry, and 2) - fractured patterns in folded rocks, are discussed. Examples taken from studies of fractured oil reservoirs are briefly presented because the author believes that much can be gained from the experience of oil exploration.

INTRODUÇÃO

O Brasil tem grande parte de seu território constituído por rochas cristalinas, das quais os granitos, gnaisses diversos, xistos cristalinos variados, quartzitos, filitos, anfíbolitos, são as mais abundantes. Nessas rochas encontram-se, subterraneamente, os únicos recursos hídricos possíveis, principalmente em áreas como o nordeste de Minas Gerais e do Brasil, onde os severos estios acabam por secar toda a água superficial. Por outro lado, noutros locais constituídos por tais tipos de rochas e onde a água superficial é abundante todo o ano, pode ser eventualmente necessário detectar possibilidades de novas reservas hídricas subterrâneas. As razões que nos impelem a isto podem ser o crescente adensamento populacional, ou o simples fato, de se necessitar de recurso hídrico subterrâneo, por inexistir água que seja de fácil acesso, de exploração econômica e em quantidade adequada e/ou suficiente. Face a tais considerações, assume grande importância o desenvolvimento de metodologia e técnicas de pesquisas desse tipo de área, visando recursos hídricos, o que é atestado pela razão de ser deste próprio simpósio. No presente artigo, apresenta-se a Geologia Estrutural como uma das ferramentas que podem auxiliar na pesquisa de águas subterrâneas nos tipos de terrenos supracitados.

FEIÇÕES ESTRUTURAIS DOS TERRENOS CRISTALINOS

Os aspectos produzidos nas rochas por movimentos durante, ou após sua formação, são ditos feições estruturais. Estas podem ser chamadas de "contínuas" se não interrompem a integridade física de uma rocha, como as dobras. São ditas "descontínuas" se interrompem tal integridade, como as fraturas, falhas, clivagens, foliação, superfícies de contato entre rochas ou formações diferentes, etc. Se tais feições são causadas por esforços tectônicos são ditas "feições estruturais tectônicas". No presente texto, usaremos esta expressão, sem o último qualificativo, para simplificação. Quando o sentido for outro, ela será qualificada. Tais feições estruturais existentes nos maciços rochosos cristalinos, são geradas em fases distintas de evolução dos maciços e uma das tarefas mais difíceis é definir a história dessas fases deformativas. Por outro lado, muitas dessas feições se instalaram em regime útil de deformação, enquanto outras se estabeleceram no regime frágil. São estas últimas, as que interessam do ponto de vista de água subterrânea. Como distingui-las?

Através da análise estrutural da trama ("fabric") é possível de se determinar os eventos deformativos e, até mesmo, as fases de deformação que afetaram determinadas áreas. Para isto, usa-se, entre outras técnicas, o critério de superposição, i.e., aquelas estruturas planares ou lineares que cortam ou deslocam outras são as mais novas, sejam elas macro, meso ou micro estruturas. As Fig. 1 e 2 e a Tabela 1 indicam a simbologia usada nesse tipo de investigação e mostram como é possível se separar as fases de deformação. Ajunta-se, ainda, a esse critério, para se revelar tais fases, os diagramas estereográficos de igual área, que permitem definir a distribuição estatística dos elementos estruturais citados (Fig. 7).

Como do ponto de vista de água subterrânea o que interessa, como se afirmou, são as feições no regime frágil, i.e., as fraturas e, como estas na evolução deformativa, são as últimas a se formar, cumpre decifrar a história tectônica da área de interesse para se definir tais fraturas. Entretanto, deve-se cuidar para o fato que fraturas formadas em fases deformativas anteriores podem, em geral, ser preservadas se a nova fase for realizada em regime frágil ou dúctil-frágil. De outra parte, fraturas estabelecidas em regime frágil podem ser totalmente obliteradas e/ou destruídas, se a nova fase deformativa se der em regime dúctil e, principalmente, se este for acompanhado de metamorfismo, com consequente cristalização generalizada. Por isto, o que interessa à hidrogeologia são, em geral, as fraturas ditas pós-cristalinas, dentre as quais as fraturas abertas são as relevantes.

Em rochas impermeáveis como granitos, gnaisses, xistos cristalinos, a produção de água é função direta e infiltração nas fraturas, falhas e fissuras e além disso, se estas são abertas ou fechadas. Em geral, fraturas fechadas não contêm água, ao passo que fraturas abertas podem conter e produzir grandes volumes d'água, dependendo, também, da taxa de recarga e da pluviometria da região.

ENSAIOS EM CORPOS DE PROVA DE ROCHAS

Os ensaios em corpos de prova, de diversos tipos de rochas, desde os trabalhos pioneiros de GRIGGS, 1939; GRIGGS & HANDIN, 1960; HEARD, 1960; HANDIN, 1960; ODE, 1960; GRAMBERG, 1965 (veja detalhes in LOCZY & LADEIRA, 1976), trouxeram-nos muitos dados, relativamente ao aparecimento de fraturas, que podem, a grosso modo, serem comparados com os existentes na natureza. Assim sinteticamente, os resultados desses testes mostram que as condições necessárias para a ruptura ou corte relacionam-se a: 1) - tensão de viatória; 2) - quanto maior a tensão média, maior é a tensão de viatória necessária; 3) - independentemente se a ruptura ocorre por fratura ou fluxo, ela é função da tensão (Figs. 3, 4). Os seguintes tipos de fratura ocorrem nos testes:

- I) - fraturas de extensão ou trativas, paralelas ao plano de σ_1 e σ_2 (Figs. 3, 4, 5). Alguns denominam-nas, também, de cliva gen axial.
- II) - fraturas de cisalhamento que se relacionam aos planos de cisalhamento máximo (Figs. 4, 5). As fraturas de cisalhamento ocorrem em geral em pares conjugados cujas superfícies se intersectam segundo σ_2 e o ângulo agudo que for

TABELA 1 - Significado dos símbolos empregados no texto e nas figuras deste trabalho

S_0	Acamamento em rochas sedimentares ou metassedimentares; em rochas ígneas a sua estrutura planar.
S_1	Foliação metamórfica-deformativa regional mais antiga, podendo, conforme o caso, ser qualificada de xistosidade, clivagem ardósia na, de rocha, etc.
S_2	Foliação metamórfica deformativa imediatamente mais nova que S_1 .
$S_3 \dots S_n$	Superfície S metamórfica ou deformativa sucessivamente mais nova.
B_1 a B_n	Charneiras de dobras relacionadas aos eventos de dobramento progressivamente mais novos F_1 a F_n .
F_1 a F_n	Eventos de dobramentos.
$SA_1 \dots SA_n$	Superfícies axiais relacionadas às dobras $F_1 \dots F_n$.
D_1 a D_n	Eventos deformativos progressivamente mais novos de 1 a n.
M_1 a M_n	Eventos metamórficos progressivamente mais novos de 1 a n.
L_1 a L_n	Estruturas lineares progressivamente mais novas de 1 a n.
/ /	Indica paralelismo entre superfícies S ou estruturas lineares; e.g. $S_0 // S_1$.
\perp	Perpendicularismo entre superfícies ou lineações.
\wedge	Relações de corte ou angulares entre superfícies S ou lineações; e.g. $S_0 \wedge S_1$; $L_1 \wedge L_2$.
CM	Corpo de minério.
λ e W	Amplitude e comprimento de onda de dobras.
$\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$	Eixos principais maior, médio e menor de elipsóide de deformação.

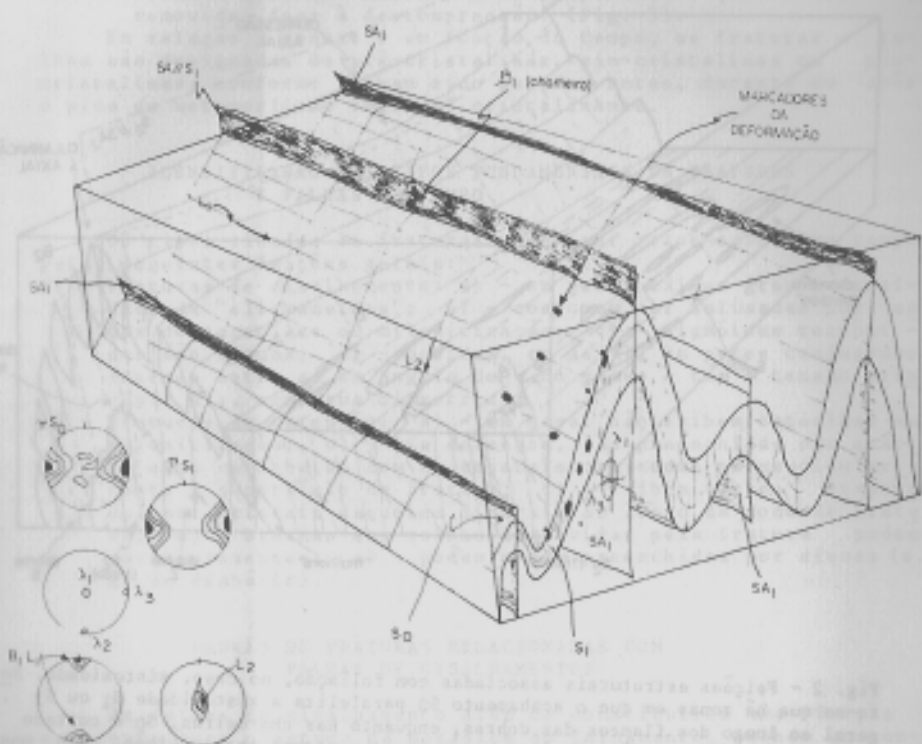


Fig. 1 - Dobras regionais da primeira Fase F_1 dobraram um pacote estratigráfico cujo acamamento é S_0 , formando-se concomitantemente uma xistosidade plano axial $S_1//SA_1$. As sobras são simétricas com charneiras horizontais B_1 . Mostra-se o elipsóide de deformação com eixos λ_1, λ_2 e λ_3 . Desenvolveu-se uma linhação de orientação mineral L_2 , em S_1 que é paralela, como indicado pelos marcadores de deformação a λ_1 , tendo-se λ_1, λ_2 paralelo à xistosidade S_1 . Os estereogramas mostram:

- distribuição algo heterogêneas de S_0 e F_1 , e S_1 .
- orientação dos marcadores de deformação e do elipsóide de deformação.
- distribuição de B_1 e L_1 .
- distribuição de L_2 (orientação mineral).

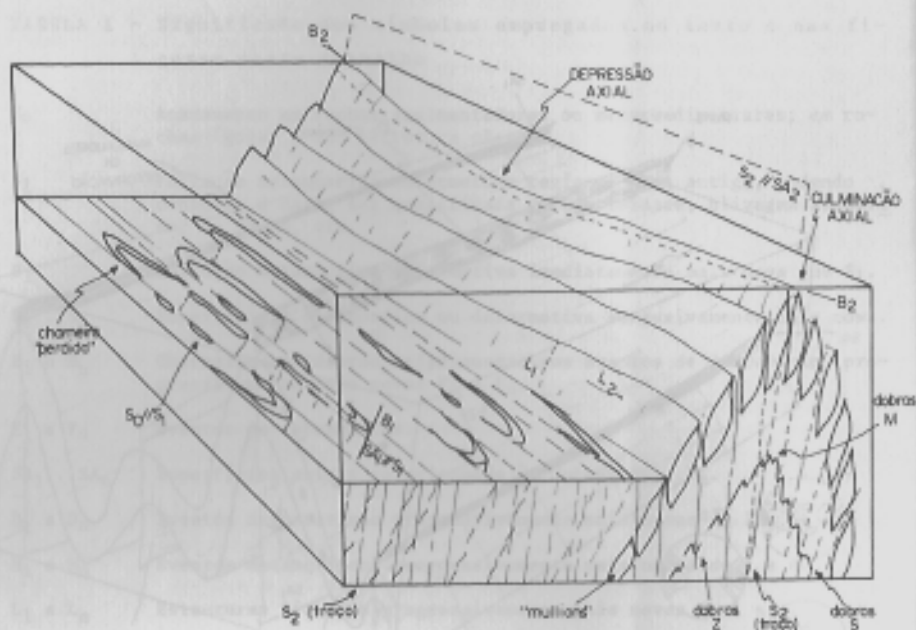


Fig. 2 - Feições estruturais associadas com foliação, no caso, xistosidade. Note-se que há zonas em que o acabamento S_0 paraleliza a xistosidade S_1 ou S_2 , geral ao longo dos flancos das dobras, enquanto nas charneiras, S_0 é cortado pelas xistosidades em ângulo forte, a menos que ocorra transposição, como nos trado à direita, na face frontal do bloco; aqui desenvolveram-se "mullions" causados pela intersecção de S_1 e S_2 , os quais tem uma seção elíptica devido à transposição, sendo paralelos à lineação $S_1 \wedge S_2$, e achatados paralelamente a S_2 ou ao plano R_1, R_2 do elipsóide de deformação correspondente ao evento D_2 . No setor esquerdo do bloco, mostram-se dobras mais antigas com charneiras $B_1 \perp B_2$ e que se repetiriam no flanco direito da dobra B_2 , não mostrado no bloco. Se, durante o desenvolvimento de S_1 , ocorrer transposição generalizada as dobras F_1 vão se apresentar como dobras intrafoliais sem raízes, ou se a transposição for mais intensa, como labios ou charneiras perdidas em forma de cabo de bengala. Corpos de minério existem que poderiam estar controlados tanto por B_1 , como por B_2 , ou por ambas as charneiras; pode-se, assim, compreender, como se torna difícil a sua exploração, mormente se a transposição for de tal monta que os "mullions" mineralizados estejam deslocados por várias dezenas de metros.

man entre si tem como bissetriz σ_1 .

III) - fraturas de relaxamento, em geral, são subhorizontais e normais a tensão máxima axial, aparecendo quando esta é renovada, face à descompressão. (Fig. 5).

Em relação à gênese e em função do tempo, as fraturas e falhas são designadas de pré-cristalinas, sin-cristalinas ou pós-cristalinas, conforme tenham sido geradas antes, durante ou após o pico do metamorfismo regional cristalizante.

IDENTIFICAÇÃO DOS TIPOS FUNDAMENTAIS DE FRATURAS E FALHAS NO CAMPO

Os tipos citados de fraturas podem ser reconhecidos no campo pelas seguintes feições gerais:

- 1) - Fraturas de cisalhamento: a) - em geral exibem grande densidade de "slickensides"; b) - costumam ser balisadas por zonas de cataclase ou milonitização; c) - signóides tectônicas são comuns; d) - ocorrem, em geral, em pares conjugados fazendo entre si um ângulo de ≈ 66 graus e têm a tensão principal σ_1 , como sua bissetriz.
- 2) - Fraturas de extensão: a) - em geral não exibem cataclase ou milonitização; b) - via de regra, são preenchidas por quartzo e/ou carbonatos com os cristais crescendo perpendicularmente à superfície da fratura; c) - exibem vazios atapetados por cristais daqueles minerais ao longo da zona de fratura; d) - brechas das rochas envolvidas pela fratura podem estar presentes; e) - podem estar preenchidas por diques (e. g. de diabásio).

PADRÃO DE FRATURAS RELACIONADAS COM FALHAS DE CISALHAMENTOS

As falhas de cisalhamento além de constituírem uma feição excelente para o estudo da mecânica do falhamento, exibem um conjunto de estruturas em padrão geométrico muito bem conhecido há vários anos (CLOOS, 1955; HARDING, 1974; LOWELL, 1984), padrão esse que se vincula ao processo de cisalhamento e guarda significativa relação com os testes em corpos de prova já mencionados. As feições geométricas principais (Figs. 8, 9) que, teoricamente, podem ocorrer todas juntas, são:

- 1) - possuem uma componente compressional "C" e uma componente extensiva "E".
- 2) - um círculo de referência original torna-se, após a deformação, em uma elipse.
- 3) - dobras em padrão dito "en echelon" (dobras escalonadas) são as que primeiro se formam, exibindo suas charneiras (em planta, seus traços axiais) grosseiramente paralelas ao eixo maior da elipse.
- 4) - "o ângulo teórico" de rumo da dobra relativamente ao binário de cisalhamento é de $\approx 45^\circ$, o ângulo real sendo de $\approx 30^\circ$, ou mesmo menos.
- 5) - paralelamente ao traço axial da(s) dobra(s), que é normal à direção de compressão, podem se instalar falhas de empurrão de alto ou baixo ângulo.

CASO	1	2	3	4	5
DEFORMAÇÃO TÍPICA ANTES DO FRATURAMENTO OU FALHAMENTO em %	<1	1-5	5-8	8-10	>10
COMPRESSÃO $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$					
TENSÃO $\sigma_1 < \sigma_2 = \sigma_3$					
DIAGRAMAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO-TÍPICOS					

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ SÃO RESPECTIVAMENTE AS TENSÕES PRINCIPAIS MÁXIMA, INTERMEDIÁRIA E MÍNIMA

Figura 3 Representação esquemática do espectro de fratura frágil até o escoamento dútil, com deformações características antes da fratura e curvas de tensão-deformação para compressão uniaxial e tensão triaxial. O hachurado, nas curvas de tensão-deformação, simboliza a variação em cada caso e o recobrimento entre os casos 3, 4 e 5 (segundo GAZDAR e HAYTON, 1960)

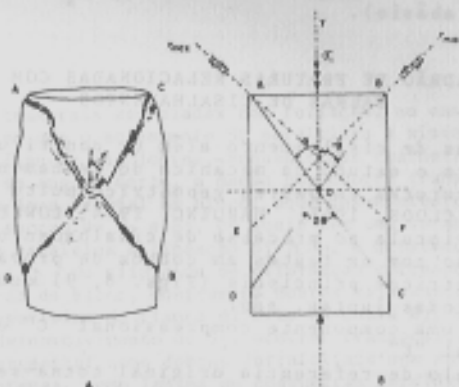


Figura 4 Fraturas de cisalhamento desenvolvidas sob ensaios de compressão. (A) Espécime de rocha com as fraturas de cisalhamento AB e CD desenvolvidas durante o ensaio de compressão. (B) Seção do espécime anterior mostrando as relações entre os planos de tensões cisalhantes máximas (τ_{max}) representados por AF e BE, calculados matematicamente e fazendo um ângulo de 45° com o eixo de tensão compressiva máxima σ_1 ; as linhas AC e BD são os planos de fraturas que realmente se formam durante os testes fazendo o ângulo $\theta = 33^\circ$ com o eixo σ_1 (Loczy-Ledeira, 75)

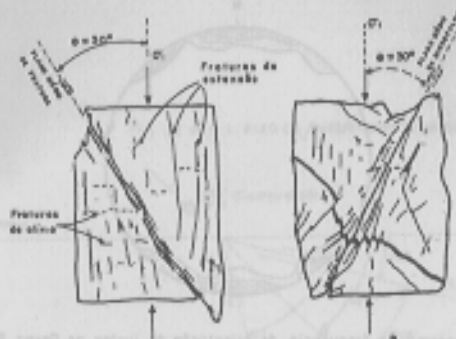


Figura 5 Fraturas de alinhamento (inclinações), de alinhamento (horizontais) e de extensão (verticais) estabelecidas em espécimes rochosos submetidos a tonsos de compressão. (A) Gneissodiorito; observa-se as fraturas subsidiárias. (B) Granito; note que a fratura de alinhamento principal é uma microfalha rejeitando uma faixa escura rica em biotita; os testes foram feitos simulando uma situação na crosta a uma grande profundidade de 17,7 km correspondente à pressão de 5 kb e a temperatura de 500 °C, aproximando-se da profundidade do fundo dos geossinclinais (baseado em BOVO e HANDEIN, 1966)

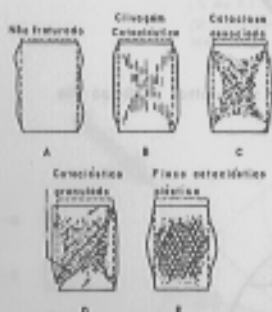
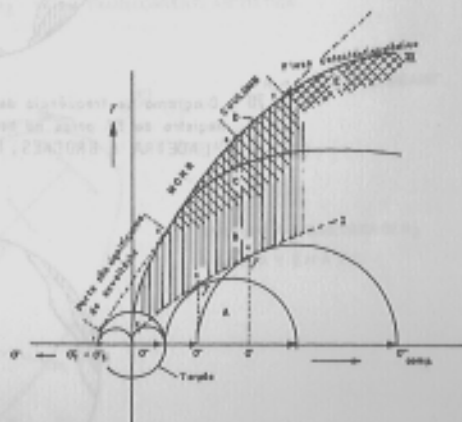


Figura 6 Espécime rochoso submetido a tensão de compressão, evidenciando vários estágios de deformabilidade representados em esboços à esquerda, e através do diagrama de tensões de MOHR, à direita (segundo TAKAHASHI, 1965)



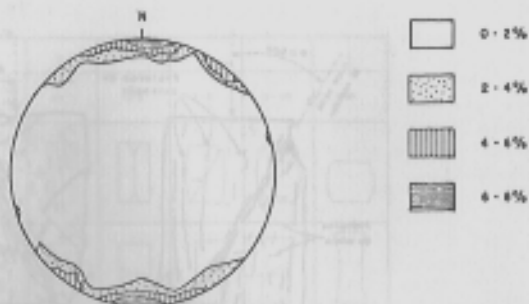


Fig. 7A Diagrama de frequência de orientação de juntas no Grupo Rio Curaçó, Bahia. Registro de 60 polos no hemisfério inferior. (Segundo LADEIRA & BROCKES, 1969)

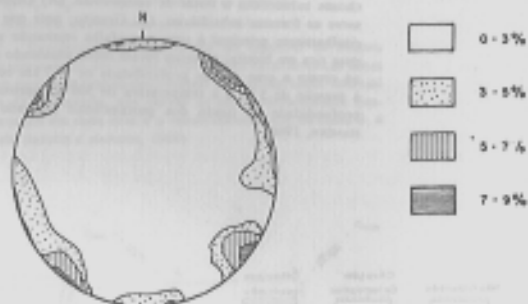


Fig. 7B Diagrama de frequência de orientação de microfalhas no Grupo Rio Curaçó. Registro de 56 polos no hemisfério inferior. (Segundo LADEIRA & BROCKES, 1969).

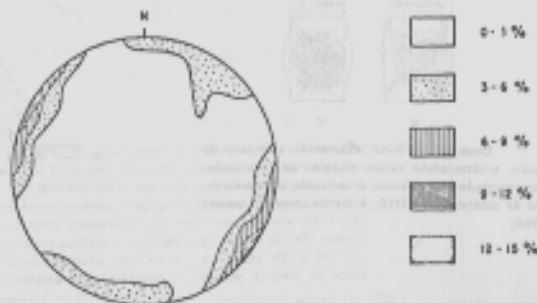


Fig. 7C Diagrama de frequência de orientação de folhas na Sequência Máfica-Ultramáfica. Registro de 70 polos no hemisfério inferior. Vale do Rio Curaçó, Bahia (Segundo LADEIRA & BROCKES, 1969)

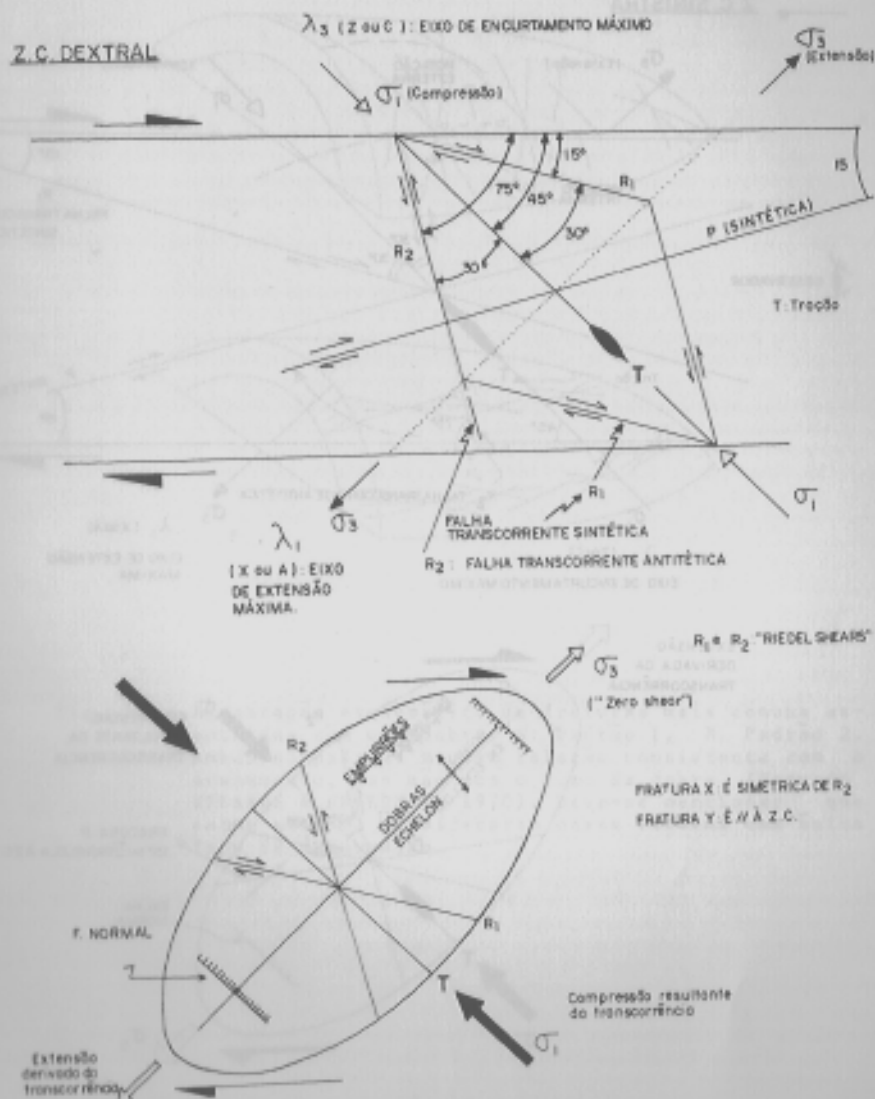


FIG. B Geometria de uma zona de falha transcorrente ou zona de cisalhamento (Z.C.) dextral. (Baseado em HARDING, 1974. Explicação no texto).

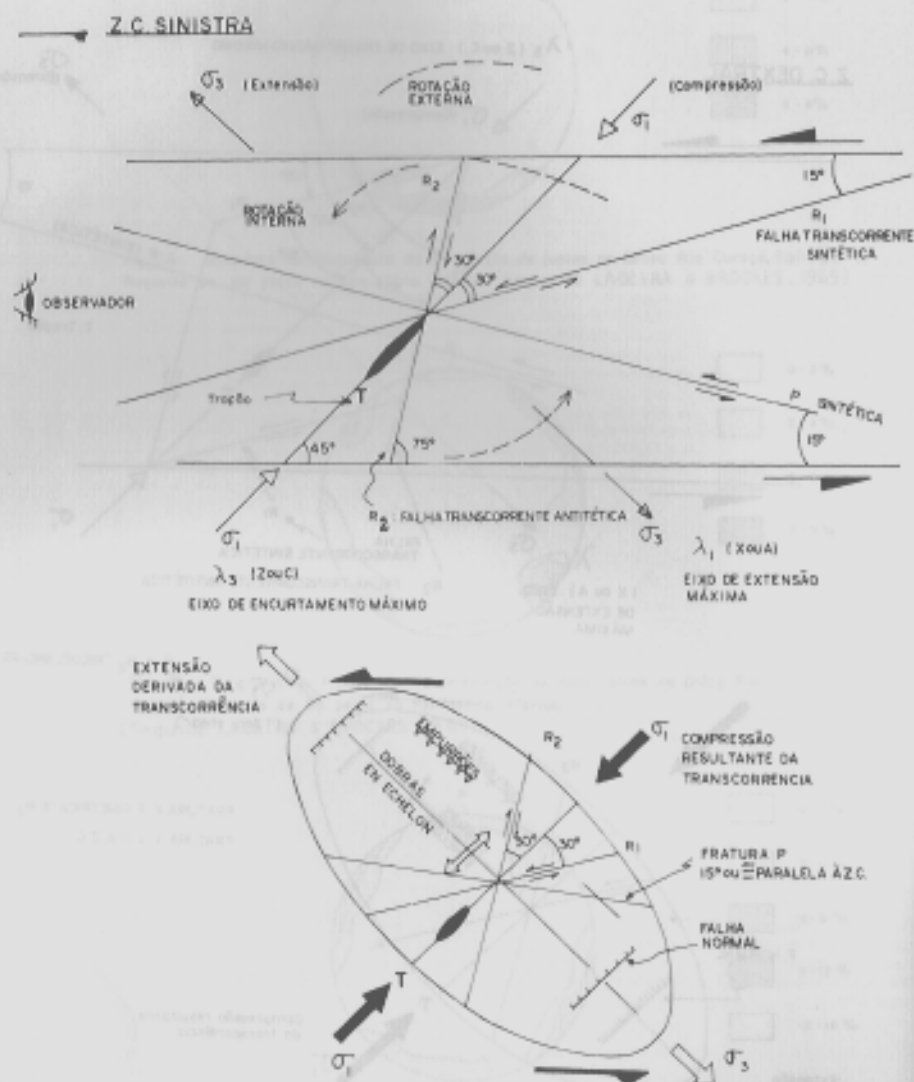


Fig. 9 Geometria de uma zona de falha transcorrente sinistra (Baseado em HARDING, 1974. Explicação no texto).

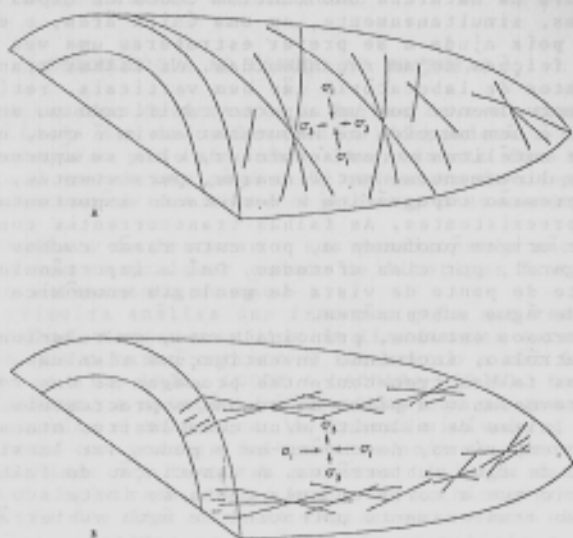


Fig. 10 - Ilustração esquemática de fraturas mais comuns associadas com uma dobra. A: Padrão 1, B: Padrão 2. Ambos os padrões mantêm relação consistente com o acamamento, mas não com o rumo da dobra. (Segundo STEARNS & FRIEDMAN, 1970). Deve-se mencionar que estes autores consideraram nesse esquema uma única fase de deformação.

- 6) - falhas de gravidade ou extensionais também podem aparecer, normais ao traço axial das dobras. Um conjunto conjugado de falhas transcorrentes sintéticas com o mesmo deslocamento que o par original (levôgero), desenvolve-se contemporaneamente com um sistema transcorrente antitético.

Embora na natureza não ocorram todos os tipos de feições supracitadas, simultaneamente, em uma única área, o esquema é interessante pois ajuda a se prever estruturas uma vez que uma ou mais das feições sejam reconhecidas. As falhas transcorrentes, em experimentos de laboratório são bem verticais, retilíneas e contínuas, eventualmente com um aspecto ramificado ou anastomosado. Este padrão é bem mantido na natureza: assim é que, em insens de radar, de satélites ou em aerofotos, elas se apresentam como espaciares lineamentos, retilíneos, persistentes, muitas vezes tendo expressão topográfica e deslocando importantes feições geológicas preexistentes. As falhas transcorrentes constituem um fenômeno de origem profunda e, por esta razão rochas do embasamento são, em geral, por elas afetadas. Daí a importância de seu reconhecimento do ponto de vista de geologia econômica e, em particular, da água subterrânea.

Numerosos estudos, principalmente, os relacionados à geologia do petróleo, incluindo investigações sísmicas, têm demonstrado, que as falhas transcorrentes propagam-se das rochas do embasamento atravessando a pilha de rochas supracrustais. Nas zonas cristalinas, faixas de milonito e/ou cataclitos atacados intensamente por intemperismo, decompõem-se e podem ser locais de bom armazenamento de água subterrânea. A associação de falha transcorrente e um rio que a corte ou nela tenha se instalado é um fator favorável ao armazenamento potencial de água subterrânea.

PADRÃO DE FRATURAS RELACIONADAS COM DOBRAS

Em geral, as fraturas associadas com as falhas, são vinculadas com o mesmo campo de tensões que produziu aquelas, considerando-se uma única fase de deformação rúptil. Já, relativamente às dobras, isto não ocorre, porque vários estudos tem demonstrado, que um corpo de rocha qualquer pode ser afetado por vários estados de tensão ao longo de uma única fase deformativa.

No entanto, de uma maneira simplificada e com base nas experiências e observações de campo, as principais posturas de fraturas em relação aos eixos de dobramentos, são as seguintes (Fig. 10). a) - fraturas de extensão, em geral perpendiculares às charneiras das dobras; b) - fraturas de cisalhamento, via de regra ocorrendo conjugadas, formando cada uma cerca de 60° com a direção da charneira da dobra, ou seja, grosso modo, aproximadamente 30° com a direção de esforços; c) - fraturas de alívio, grosseiramente paralelas às charneiras das dobras.

Deve-se ressaltar, mais uma vez, que este padrão se refere às fraturas que se desenvolveram como resultado da mesma tensão causadora do dobramento. Se mais de uma fase de dobramento afetou a área de interesse, somente fraturas geradas durante a aplicação da tensão responsável pela última fase é que manterão tal tipo de padrão.

Inúmeras outras fraturas e/ou falhas preexistentes, de fases

anteriores e, portanto, deformadas, não terão nenhuma relação com as charneiras das dobras da última fase. Não obstante, como elas foram medidas, elas compõem o diagrama sinótico integrado, que permitirá estabelecer o "modelo de deformação integrada" para a área, mesmo que as feições deformativas de fases precedentes não tenham sido adequadamente deslindadas.

METODOLOGIA NO ESTUDO DE FRATURAS

No levantamento de fraturas e falhas deve-se ter em mente que, da qualidade dos dados levantados, dependerá a acuracidade das interpretações: por isto, este levantamento deve ser organizado. A Tabela 2 mostra uma página de caderneta de campo para o registro de observações com estes objetivos, destacando-se os seguintes:

- I) - a densidade de fraturas e sua persistência são aspectos importantes em qualquer estudo de litotipos fraturados sejam estes embasamento ou não.
- II) - uma primeira análise das fraturas pode ser realizada via aerofotos. Marcam-se todos os lineamentos estruturais (observe que o termo correto é lineamento e não lineação; c.f. HOBBS et al., 1976, LOCZY & LADEIRA- 1976). Em um esboço preliminar, a relação das fraturas com os grandes lineamentos devidos a charneiras de dobras visíveis e possíveis, bem como com grandes falhamentos pode se tornar aparente.
- III) - a densidade das fraturas por área (tirada das imagens) pode ser registrada, nessa etapa de fotointerpretação. Os azinutes das fraturas são registrados e com eles podem ser obtidos diagramas em rosácea que permitirão a visualização estatística das fraturas. Pode-se, também, nesse caso usar-se "análise estatística espacial" (PINCUS, 1951), e.g. "análise de superfícies de tendências", e seus respectivos resíduos, das fraturas e outras feições estruturais da área de interesse (veja e.g., SILVA, 1984).
- IV) - em trabalhos de campo, registra-se a densidade em termos de número de fraturas por m^2 , enquanto o número delas por exposição ou afloramento o será por m^3 .
- V) - Pode-se, de modo simples, ter-se uma primeira visão da distribuição das fraturas, lançando suas atitudes, juntamente com a densidade de fraturas ao lado, sobre o mapa geológico da área, obtendo-se um "mapa de padrão de fraturas".
- VI) - registre-se a espessura das camadas e respectivos litotipos em cada ponto, pois, estes fatores controlam a densidade das fraturas. A litologia e a espessura de camadas competentes influencia o espaçamento de fraturas que estas exibem, estando as fraturas nelas contidas, ou intersectando-as. Existe entre esses dois fatores uma relação, considerada por muitos autores como linear, do tipo:

$$E = K.Ce$$

onde, E é o espaçamento, Ce a espessura da camada e K uma constante relacionada à litologia da camada. Para maiores detalhes, veja LADEIRA & PRICE (1981) e PRICE (1974).

A experiência mostra que a relação existente é uma razão inversa, quando se comparam camadas de litologia similar, mas

TABELA 2

SUGESTÕES DE REGISTRO EM CADERNETA DE CAMPO

Número de Estação..... Lítessona.....

Localização.....

Atitude de superfícies S (mergulho e direção; ou azimute e caimen da linha de máxima declividade da superfície)

S₀S₁ (foliação deformativa metamórfica)S₂ (foliação)S₃ (foliação)Descrição Litológica

Deve-se incluir aqui descrição dos tipos litológicos, grau de im-
temperização, espessura, estrutura interna e outros dados perti-
nentes.

Descrição das fraturas

As fraturas deveriam ser descritas em função da ordem de desenvol-
vimento ou de proeminência. As mais marcantes e mais persistentes,
tendo a mesma orientação, são chamadas de conjunto ou ordem 1, po-
dendo-se usar o símbolo F₁. O segundo conjunto será F₂, e assim
por diante.

F₁: atitude (mergulho e direção; ou azimute e caimento da linha
de máxima declividade de sua superfície).

número de fraturas por m².

persistência, comprimento, aspecto da superfície da fratura,
presença de "slickensides" ou não. Se abertas ou fechadas;
preenchimento.

F₂: como no caso precedente, e assim, por diante.

Área de observação: detalhes do afloramento no qual as fraturas
foram examinadas.

OBSERVAÇÕES ADICIONAIS

AMOSTRAGEN: c/AM: descrição & nº

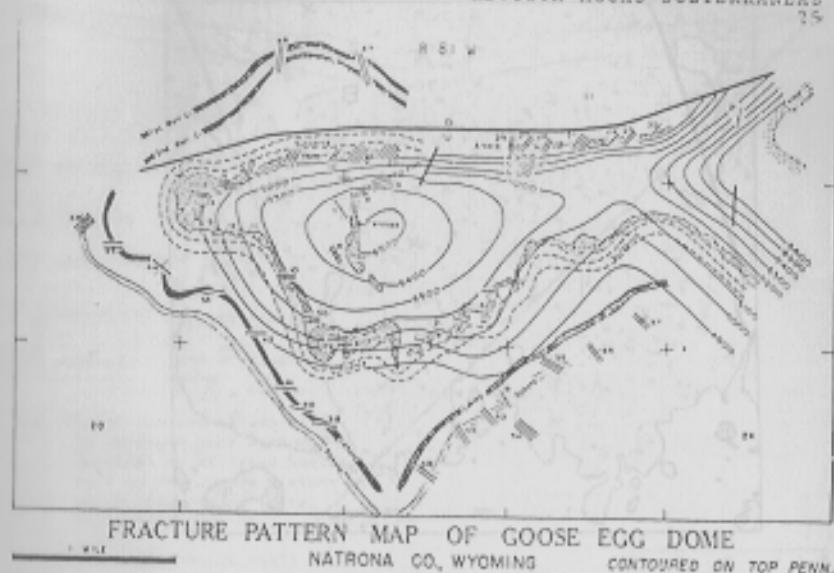
sem AM : marcar com um "X" ou "V".

espessuras diferentes. Assim, pode-se estabelecer a expressão a seguir, relacionando a espessura e a litologia para camadas diferentes de um mesmo domínio estrutural. Seja uma camada datum "A" com espessura de \bar{a} m tendo 10 fraturas por m^2 e, na mesma área, uma outra camada "B" com \bar{b} m, de espessura, com 25 fraturas por m^2 . O fator litológico para correção da densidade de fraturas na camada "B" em função da "A" é pois:

$$A/B = 10/25 = 2/5$$

Mesmo que o litotipo "B" tenha uma espessura de 10m, tendo as mesmas 25 fraturas/ m^2 , a espessura unitária para ela seria 10m, mas, o fator litológico permanecerá o mesmo. Calculando-se tais fatores para várias unidades rochosas, eles podem ser normalizados e referenciados a um horizonte datum. Com isto, por pontos com igual concentração de fraturas podem ser passadas linhas ligando valores iguais de densidade de fraturas, que são denominadas de "linhas de isofraturas" e o mapa resultante de "mapa de isofraturas". Tal é o mapa da Fig. 11 (HARRIS et al. 1960), onde o fluido de interesse foi o petróleo. Mas o método é aplicável para água subterrânea. O mapa de isofraturas pode ser comparado, então, com o mapa de padrão de fraturas.

- VII) - A persistência pode ser anotada em termos de "boa, média, ruim", ajuntando-se a extensão da persistência em metros e ela se confina a uma única camada ou se intersecta várias.
- VIII) - a regularidade é anotada também na base de "boa, média, ruim".
- IX) - a natureza da superfície da fratura, talvez seja o dado mais difícil de se registrar, pois, depende da experiência de campo do geólogo, de seu "olho clínico". A superfície da fratura pode indicar a profundidade onde se deu a gênese, circulação de fluidos e taxa de deformação rochosa. Assim, as estrias ("slickensides") são indicativas de uma origem compressiva, enquanto filmas de carbonato, vênulas de quartzo, e figuras plumosas sugerem origem trativa; cataclase e silonitização, por outro lado, podem denunciar elevadas pressões confinantes e temperaturas.
- X) - para facilitar a manipulação dos valores das fraturas e a manipulação de gráficos, e.g., rede estereográficas, eles podem ser registrados sob a forma de azimute da linha de máxima declividade da superfície e o valor angular de seu caimento.
- XI) - convém, sempre que possível, ajuntar desenhos do padrão de afloramento e o modo como as estruturas se relacionam. Usar escala gráfica, nos esboços.
- XII) - construção de estereogramas de rede equi-área ou diagramas em rosacea (ver LOCEY & LADEIRA, 1976; HOBBS et al., 1976; ou SPENCER, 1977; QUADE, 1984; para detalhes de construção). Tais diagramas (Fig. 7) permitirão obter-se dados estatísticos gráficos sobre as fraturas. Com o uso de computação pode-se agilizar o tratamento dos dados produzindo-se os diagramas automaticamente (MARTINS et al., 1985).



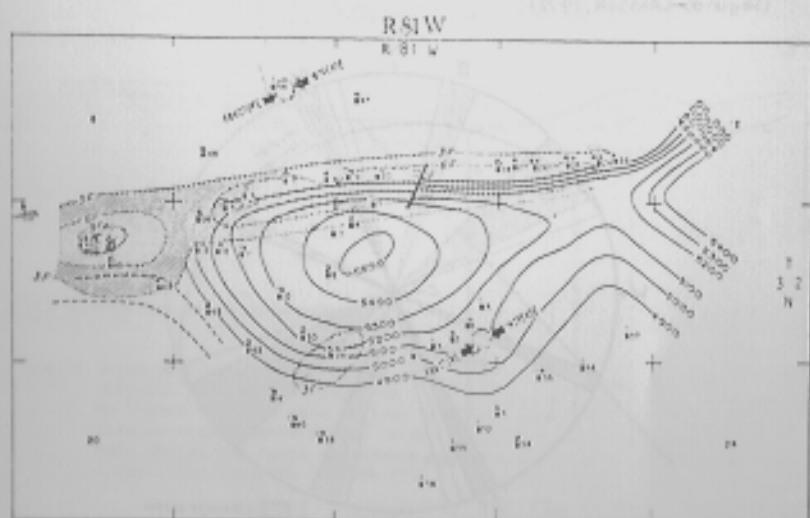
- ▣ 10 to 2nd Well Creek
- ▣ Lateral
- ▣ Dakota
- ▣ Sandstone

- ▣ Along
- ▣ Easterly
- ▣ Northerly

LEGEND

- ↖ Steep NE-SW Direction
- ↘ Easterly Direction
- ↖ Strike Number

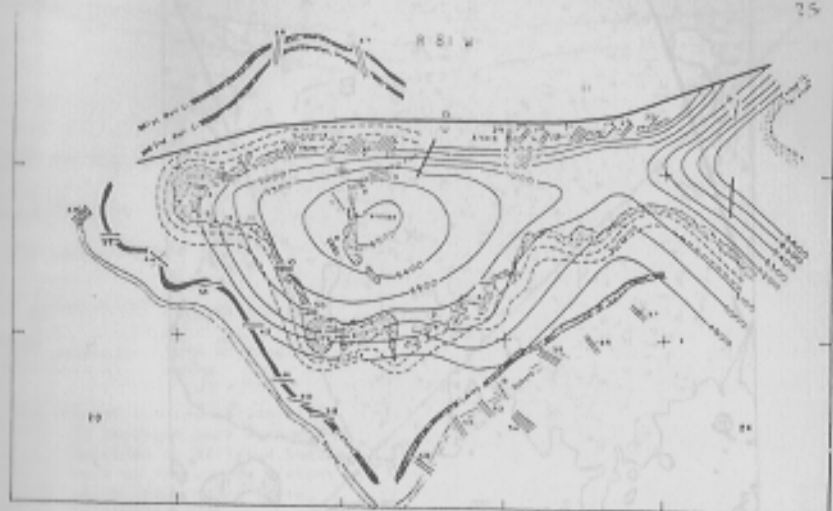
- Fractures Per Well
- Less Than 2
- 2 to 4
- 4 to 6



- DATUM BED FOR FRACTURE DATA IS ALTAIA 1 MAPPING
ISOFRAC CONTOUR INTERVAL IS 2 FRACTURES PER WELL
- ▣ AREA OF 2 OR MORE FRACTURES PER WELL
 - ▣ AREA OF 1 FRACTURE PER WELL
 - ▣ AREA OF NO FRACTURES PER WELL

Fig. 11. A. Mapa de padrões de fraturas do Domo de Goose Egg (E.U.A.).

Fig. 11. B. Mapa de iso-fratura do Domo de Goose Egg (E.U.A.). A (e B) em inglês, segundo HARRIS et al., 1960.



FRACTURE PATTERN MAP OF GOOSE EGG DOME
NATRONA CO., WYOMING
CONTOURED ON TOP PENN.

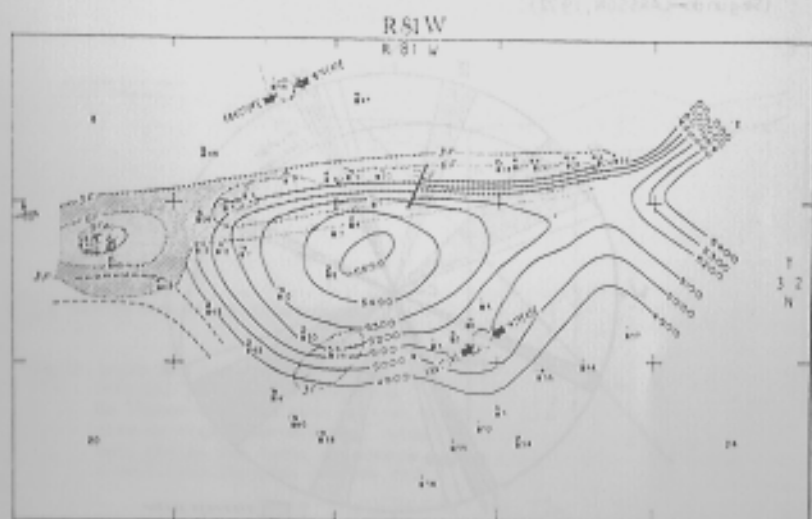
10 & 2nd Well Creek
Lagoon
Dakota
Sundance

Alluvium
Embay
Terracing

LEGENDE

5000 NE-SW Direction
5000 SW-SE Direction
Station Number

Fractures Per Yard
Less Than 2
2 to 4
4 to 6



ISO-FRACTURE MAP OF GOOSE EGG DOME
NATRONA CO., WYOMING
CONTOURED ON TOP PENN.

DATUM BED FOR FRACTURE DATA - ALPHA 1, MIDDLEINE
CONTOUR INTERVAL IS 2 FRACTURES PER YARD

AREA OF 2 OR MORE FRACTURES PER YARD CONTOURED IN [Symbol] AREA OF 1 TO 2 FRACTURES PER YARD CONTOURED IN [Symbol] AREA OF 0 TO 1 FRACTURE PER YARD CONTOURED IN [Symbol]

Fig. 11. A. Mapa de padrão de fraturas do Domo de Goose Egg, U.S.A.

Fig. 12. B. Mapa de iso-fratura do Domo de Goose Egg, U.S.A., a 1:25,000 escala, segundo HARRIS et al., 1960.

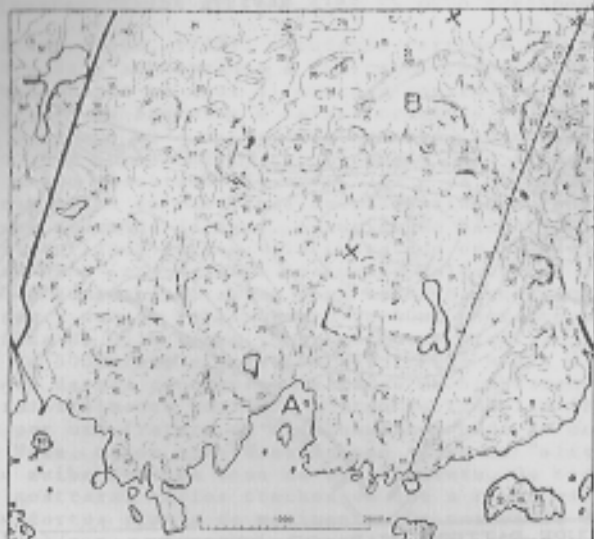


Fig. 12 Mapa de contorno da parte mais meridional da área do granito Karlshamn. Linhas negras: diabásios; A-B: vale de fratura de extensão; x: as localidades de sondagem para água subterrânea de Hallaryd e Tranelid, Suécia. (Segundo LARSSON, 1972).

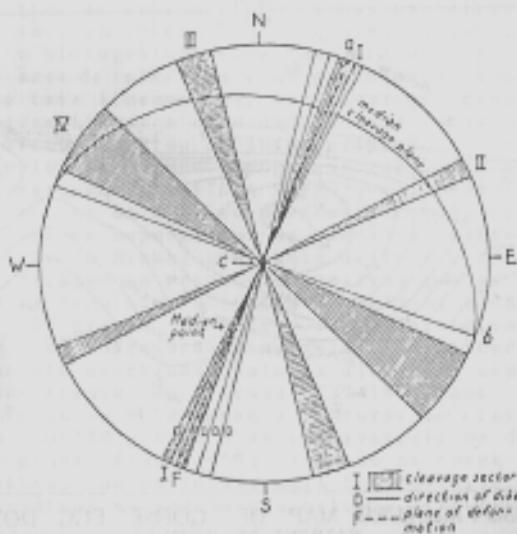
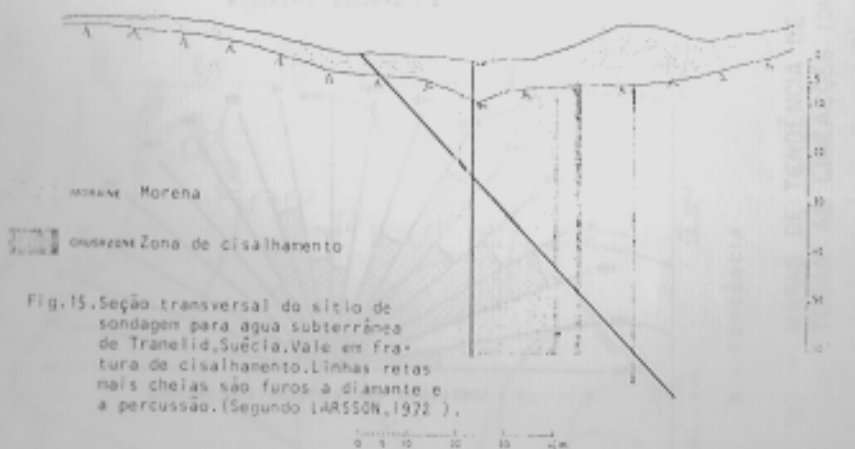
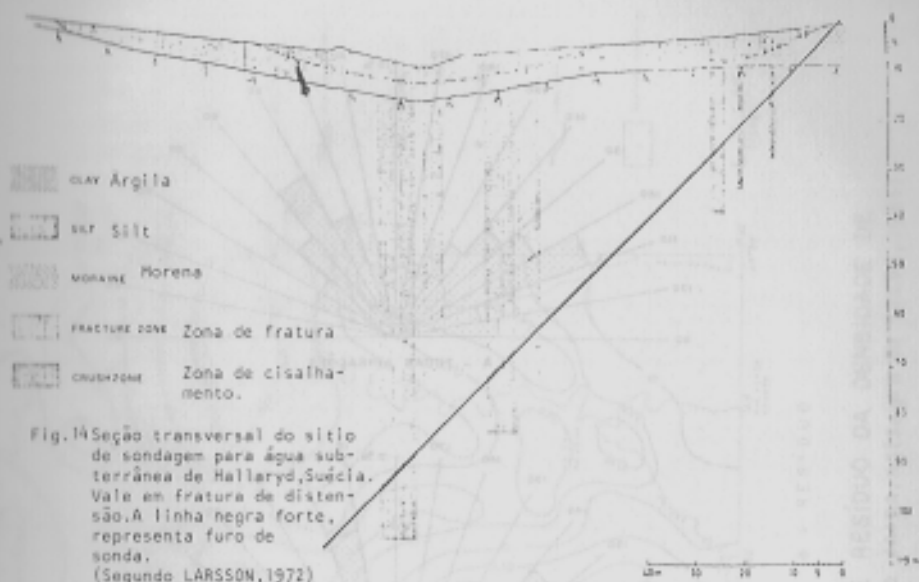


Fig. 13. Coleção de dados de clivagem pós-cristalina para a mesma área. (Segundo LARSSON, 1968).



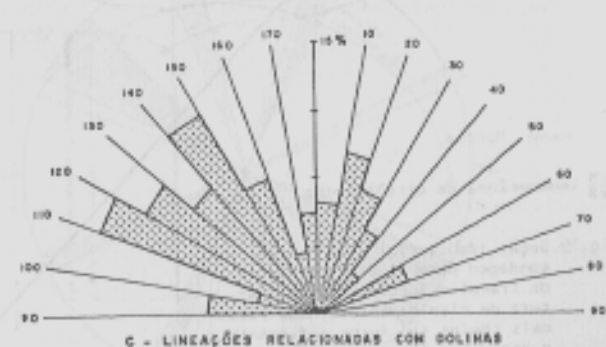
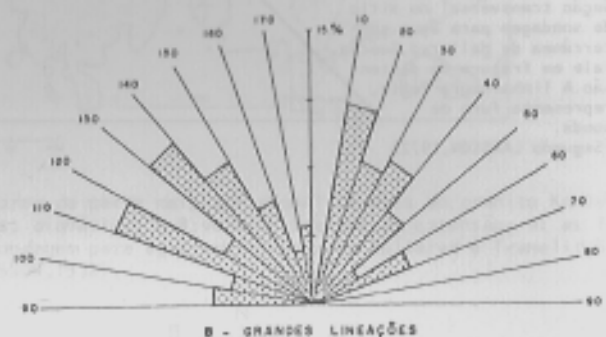
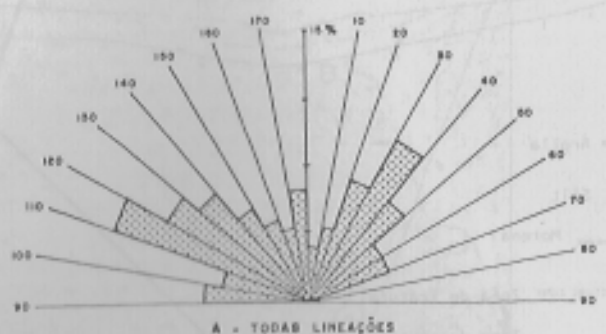


FIGURA 16. - DIAGRAMAS DE FREQUÊNCIA DAS DIREÇÕES DAS LINEAÇÕES ZONA CARSTICA DO JAIBA, MG (Segundo SILVA, 1984).

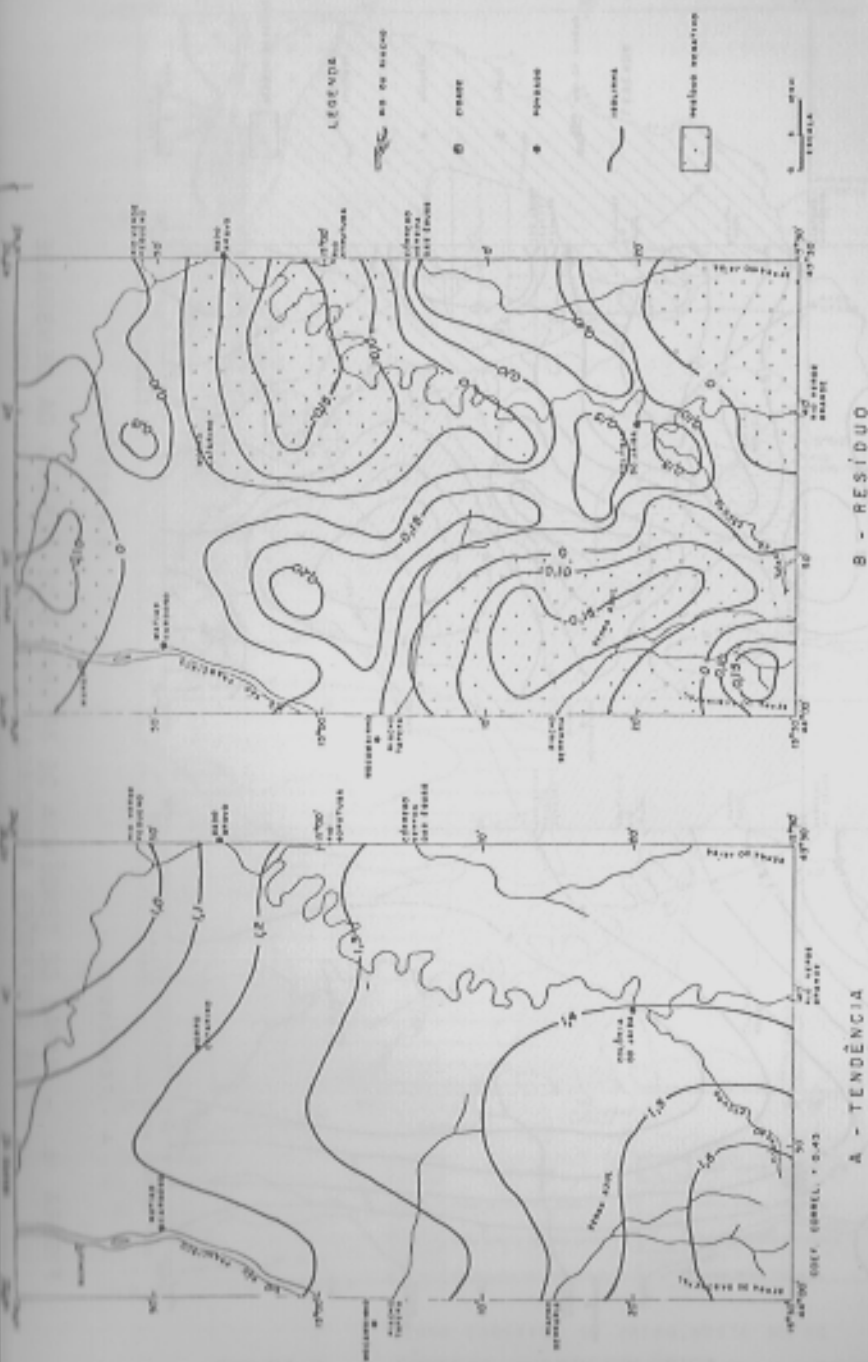
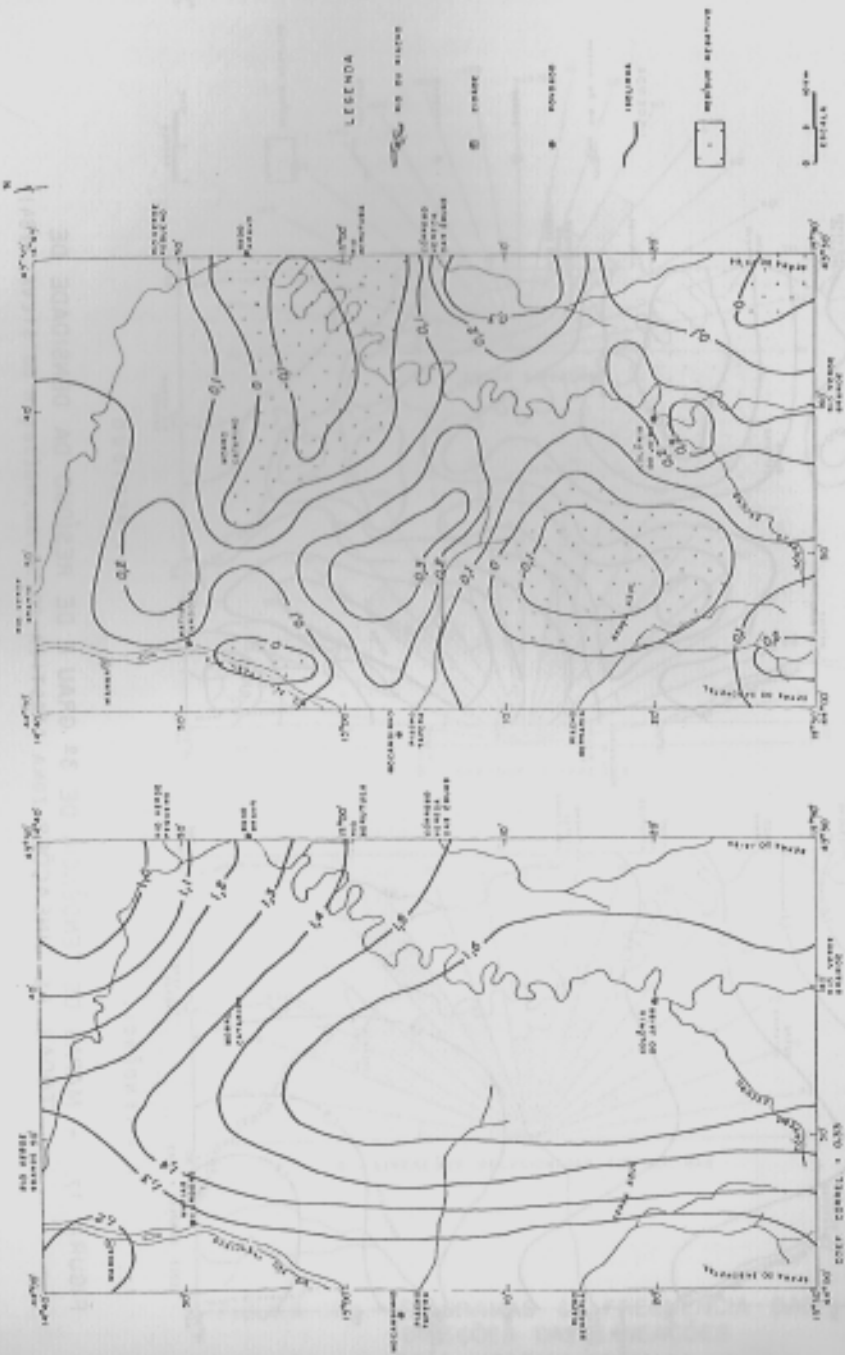


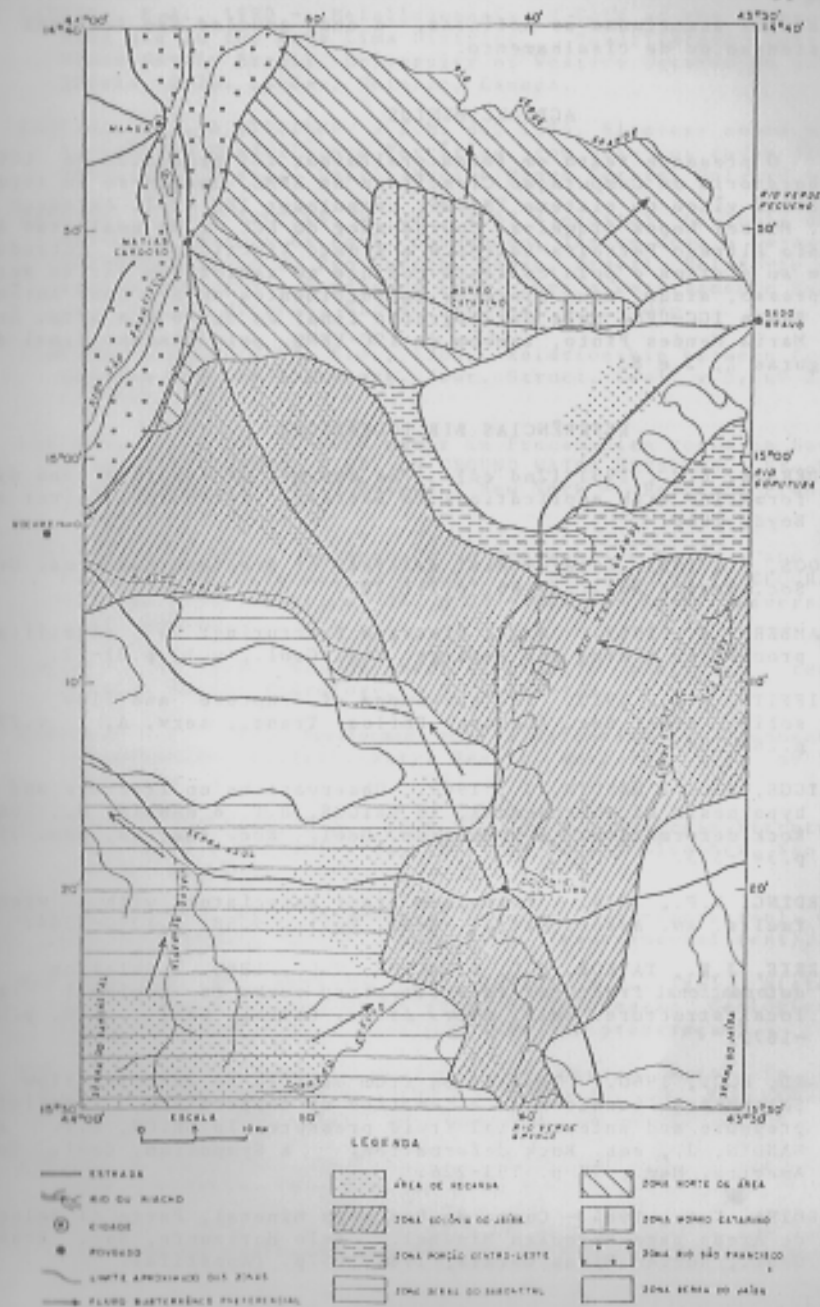
FIGURA 17. - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3^o GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DE TODAS AS LINEAÇÕES. ZONA CARSTICA DO JAIBA, MG (Segun do SILVA, 1984)



B - RESÍDUO

A - TENDÊNCIA

FIGURA 18. - MAPAS DE TENDÊNCIA DE 3º GRAU E DE RESÍDUO DA DENSIDADE DE LINEAÇÕES ASSOCIADAS A DOLINAS (Segundo SILVA, 1984).



ZONA CARSTICA DO JAÍBA, NORTE DE MG

FIGURA 19. - SÍNTESE HIDROGEOLOGICA (segundo SILVA, 1984)

fraturas associadas às dolinas, e onde aquelas são fraturas de distensão ou de cisalhamento.

AGRADECIMENTOS

O presente texto em forma preliminar foi produzido no LCC - Laboratório de Computação Científica da UFMG, usando-se um terminal com vídeo do sistema VM/CMS, computador IBM 4341. Agradeço ao Dr. Manoel Lopes Siqueira, Coordenador do LCC, e os analistas Antônio Alfredo Ferreira Loureiro e Renato Viçti por me introduzirem no sistema e pela cortesia com que me assistiram várias vezes. Expresso, ainda, meus sinceros agradecimentos ao Sr. José Antônio S. Bessa IGC-UFMG pela datilografia final do texto e a Srta. Ângela Maria Mendes Pinto, também do IGC-UFMG, pelo desenho final das figuras 1, 2 e 8.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDERSON, E.M., 1951 (2nd ed). The dynamic of faulting and dyke formation with applications to Britain. Edinburgh, Oliver and Boyd, 206p.
- CLOOS, E., 1955. Experimental analysis of fracture patterns. Geol. Soc. America Bull., v.66, p.241-256.
- GRAMBERG, J., 1965. Axial cleavage fracturing: a significant process in mining and geology. Eng. Geol., v.1, p.31-72.
- GRIFFITH, A.A., 1920. The phenomena of rupture and flow in solids. Royal Soc. (London) Philos. Trans., ser. A, v.221, p.163-198.
- GRIGGS, D.T. & HANDIN, J., 1960. Observations on fracture and a hypothesis of earthquakes, in GRIGGS, D.T. & HANDIN, J., eds. Rock deformation: a Symposium. Geol. Soc. America, Mem. 79, p.347-373.
- HARDING, T.P., 1974. Petroleum traps associated with wrench faults. Am. Assoc. Petrol. Geol. Bull., v.58, p.1290-1304.
- HARRIS, J.F., TAYLOR, G.L. & WALPER, J.L., 1960. Relation of deformational fractures in sedimentary rocks to regional and local structure. Bull. Amer. Assoc. Petrol. Geol., v.60, p.1853-1872.
- HEARD, H.C., 1960. Transition from brittle to ductile flow in Salenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure and interstitial fluid pressure. In GRIGGS, D.T. and HANDIN, J., eds. Rock deformation: a Symposium. Geol. Soc. America, Mem., 79 p. 193-226.
- LADEIRA, E.A., 1984 - Curso de Pesquisa Mineral, Parte A: Seleção de Áreas para Pesquisa Mineral. Belo Horizonte, Soc. Brasil. Geol., Núcleo Minas Gerais, 1984. 157p. (Apostila).

- LADEIRA, E.A., 1980 - Metallogenesis of Gold at the Morro Velho Mine and in the Nova Lima District. Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais Brazil. University of Western Ontario Un publ. PhD Thesis, 272p. London, Ontario, Canada.
- LADEIRA, E.A. & VIVEIROS, J.F.M. de, 1984. Hipotese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero, com base nos dados disponíveis. Sec. Brasil. Geol., Núcleo Minas Gerais, Bol. nº 4, 48p.
- LADEIRA, E.A. & BROCKES, H. Jr., 1969 (Inédito). Geologia das Quadrículas de Poço de Fora, Esfomeado, Tanque Novo e Lajes, Distrito Cuprífero de Rio Curaçá, Bahia, Brasil. Relatório da Companhia Geologia e Sondagens Ltda. para o Departamento Nacional de Produção Mineral. Rio de Janeiro. V.1, 209p.
- LADEIRA, F.L. & PRICE, N.J., 1981. Relationship between fracture spacing and bed thickness. Jour. Struct. Geol. v.3, nº 2, p. 179-183.
- LARSSON, I., 1968. Ground water in Precambrian rocks in Southern Sweden. In INTERN. SIMP. ON GROUND WATER PROBLEMS, Stockholm, 1966. Proceedings... Oxford & New York - Pergamon Press, p. 23-41.
- LARSSON, I., 1967. Anisotropy in Precambrian Rocks and post-crystalline deformation models. LUND STUDIES IN GEOGRAPHY, Ser. A, Phys. Geogr., nº 38, p.237-246. The Royal University of Lund, Sweden.
- LARSSON, I., 1972. Ground water in granite rocks and tectonic models. Nordic Hydrology, v.3, p.111-129.
- LEGRAND, H.E., 1971. Development and distribution of permeability in carbonate aquifers. Water Resour. Research, v.7, nº 5, p. 1284-1294.
- LOCZY, L. & LADEIRA, E.A., 1976 (1a. ed.), Geologia Estrutural e Introdução a Geotectônica. Editora Edgard Bluecher, São Paulo - CNPq, Brasília, 528p.
- LOWELL, J. D., 1984. Structural Geology. (pre-impressão). Oil & Gas Consultants Intern., Inc. 400p. (experimental text).
- MARTINS, P.P. Jr., LADEIRA, E.A., TANNUS, M.B., 1985. Sistema de Tratamento Gráfico e Estatístico de Informação Geológica para Cartas Prospectivas e Metalogênicas (em preparação).
- ODÉ, H., 1960. Faulting as a velocity discontinuity in plastic deformation, in CRIGGS, D.T. & HANDIN, J., eds., Rock deformation: a symposium. Geol. Soc. America, Mem. 79, p.293-321.
- PINCUS, H.J., 1951. Statistical methods applied to the study of rock fractures. Geol.Soc. America Bull., v.62, nº 2, p.81-129.
- PRICE, N.J., 1974. The development of stress systems and fracture patterns in sediments not subjected to tectonic deformation.

Proc. 3rd Int. Congr. Rock Mech., Denver 1A, p.487-496.

QUADE, H., 1984. Die Lagenkugelprojektion in der Tektonik. Clausthaler Tecton. Heft. 20, 196p., Clausthal-Zellerfeld.

SIDDIQUI, S.H. & PARIZEK, R.R., 1971. Hydrogeologic factors influencing well yields in folded and faulted carbonate rocks in Central Pennsylvania. Water Resour. Research, v.7, n° 5, p.1295-1312.

SILVA, A.B., 1984. Análise morfoestrutural hidrogeológica e hidroquímica no estudo do aquífero cárstico do Jaíba, norte de Minas Gerais. Tese Doutorado, Inst. Geociências, Univ. São Paulo, São Paulo, 190p.

SPENCER, E.W., 1977. (2nd ed). Introduction to the structure of the Earth. McGraw Hill Book Co., New York, 640.

STEARNS, W.D. & FRIEDMAN, M., 1972. Reservoirs in Fractured Rock. Amer. Assoc. Petrol. Geol., Memoir 16, p.82-106.

NOTA

Este trabalho foi apresentado no I Simpósio Nacional de Água Subterrânea em Rochas Fraturadas realizado no período de 07 a 09 de agosto de 1985 em Belo Horizonte - MG.

HIDROGESP

POÇOS ARTESIANOS

ESTUDO DE VIABILIDADE
PROJETOS CONSTRUTIVOS
CONSTRUÇÃO
OPERAÇÃO
RECUPERAÇÃO
MANUTENÇÃO

TECNOLOGIA AVANÇADA NA PERFURAÇÃO DE POÇOS

SÃO PAULO: Rua Dr. Macedo Trancoso, 128 - Água Branca
Fone : (011) 262-4822

S.J. CAMPOS: Rua Goiânia, 294 - Parque Industrial
Fone : (0123) 31-4133 - 31-1186