

## A HIDROGEOLOGIA DO CRISTALINO À LUZ DA MECÂNICA DAS ROCHAS

Walter Duarte Costa  
Professor da UFPE

### ABSTRACT

Among the factors affecting the qualification of an aquiferous, in crystalline rocks, one can distinguish the physiographic, lithological and structural aspects. The geological aspects meet in the rock mechanics, an easy explanation for their large interference in the hydrogeological behavior in this kind of rocks.

The existence of open discontinuity plans, mainly fractures, is the main condition to make possible a circulation of water at depth, allowing its constant renewal and an easy exploitation.

The opening of these plans are in turn, function of the elastic characteristics of the rocks, the tensional state and the different strenght to rupturing. The greater the modulus of elasticity (E), the greater the intensity of traction stress created, admitting rupture by traction with open fractures. This is the reason in view of the rocks, predominantly granular (greater E) as gneiss, have more open fractures, that intensively foiated rocks, as micaschist. On the other hand, the state of tridimensional tension, restrict several types of ruptures, as function of the state of confinement of the rocks and the characteristics of strenght to the traction and to the shearing of these rocks.

The main consequence of this situation, is the relationship between old orogenic zones and late epirogenic movements, allowing relief tensions, in the same direction of the greater orogenic stress, generating fractures of traction, parallel to foliation.

Such a fact explains why these fractures parallel the foliation, designated of "longitudinal fractures", present a large potential as storage of groundwater.

### 1. - PRINCIPAIS CONDICIONANTES NATURAIS PARA A HIDROGEOLOGIA DO CRISTALINO.

Os inúmeros condicionantes naturais que influenciam na hidrogeologia do cristalino e que foram já detalhadamente analisados por COSTA (1965), podem ser agrupados em três classes, a saber:

- I) Aspectos fisiográficos
- II) Aspectos litológicos
- III) Aspectos estruturais

Todos esses agentes participam, com maior ou menor responsabilidade, na qualidade e quantidade das águas acumuladas nas rochas cristalinas, daí porque, essas influências podem ser analisadas separadamente.

#### 1.1. - Qualidade das águas subterrâneas do cristalino

A qualidade dos depósitos hídricos subterrâneos, depende basicamente de três condições:

- dificuldade de alteração química dos minerais (litologia)
- possibilidade de realimentação d'água periódica (pluviometria)

- facilidade de percolação da água no interior do maciço rochoso (estruturas)

A ausência de uma dessas condições é já suficiente para contribuir com uma salinização das águas contidas nos vazios do maciço, geralmente ao longo de suas descontinuidades.

### 1.2. - Quantidade de água subterrânea no cristalino

A quantificação e, sobretudo, a capacidade de exploração das águas subterrâneas em rochas cristalinas, dependem fundamentalmente de dois condicionantes:

- existência de grande volume de vazios, representados geralmente por fraturas abertas.
- possibilidade de recargas d'água periódicas (pluviometria)

Em princípio, poder-se-ia considerar, como o principal desses condicionantes, a existência de planos de descontinuidade abertos e, nesse caso, deveria ser levado em conta, não apenas as características do estado de tensões que gerou essas descontinuidades, mas também, as características elásticas da rocha, que são as responsáveis pelo tipo de deformação sofrida pelo maciço.

Sabe-se por exemplo, que as fraturas de um gnaiss são mais abertas que as de um micaxisto, para um mesmo estado de tensões atuantes, o que possibilitaria, em princípio, acumular maiores quantidades de água e de melhor qualidade, no primeiro desses tipos rochosos.

Ocorre que as tensões são diretamente proporcionais ao módulo de elasticidade ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ) e, sendo esse módulo mais elevado nas rochas com predomínio de minerais granulares, as tensões de tração, geradas pelos esforços compressivos, assumem maiores valores no gnaiss, provocando conseqüentemente, maiores deformações, representadas por fraturas mais abertas.

Excluindo-se portanto, a ação dos agentes climáticos e fisiográficos, além das características químicas dos minerais quando são atacados pela água, conclui-se que, reside na configuração estrutural dos maciços rochosos, a principal influência dos condicionantes naturais, para a qualificação e quantificação dos recursos hídricos subterrâneos nas rochas cristalinas.

## 2. - ANÁLISE DO COMPORTAMENTO ESTRUTURAL

Sabe-se que a porosidade intersticial das rochas cristalinas é muito reduzida, ficando assim a sua permeabilidade, reduzida aos caminhos de percolação através das descontinuidades desses maciços rochosos.

As descontinuidades mais frequentes, são representadas pelos planos de xistosidade, estratificação, fraturas e falhas. Os dois primeiros tipos, pela sua própria gênese, são geralmente planos muito fechados, tendo muito pouca significação como armazenadores de água subterrânea.

Restará pois, uma análise mais detalhada dos diversos tipos de fraturas e falhas e sua significação no comportamento dos maciços rochosos cristalinos, com vista ao estudo da hidrogeologia nesses meios.

No trabalho de COSTA (1965), foi analisada a influência de 3 (três) tipos de estruturas raturais, denominadas fendas transversais, angulares e longitudinais, sobre a quantidade e qualidade de águas no cristalino. Os valores médios (50 poços) encontrados para tais relações foram os seguintes:

TIPO DE FENDA	Nº DE POÇOS	VAZÃO MÉDIA (l/h)	RES.SECO MÉDIO (mg/l)
Transversal	23	5.139	2.091
Angular	24	2.583	3.966
Longitudinal	3	4.400	1.210

Como se observa nesse quadro, as fraturas transversais apresentaram me-

lhores vazões, enquanto as angulares, apresentaram não somente as piores condições quantitativas, mas também qualitativas.

Essa conclusão encontra fácil explicação, na mecânica das rochas. Na verdade, o comportamento de deformação rutural dos maciços rochosos, é idêntico àquele verificado num ensaio de compressão uniaxial ou triaxial onde somente dois tipos de rutura podem acontecer, dependendo das resistências à tração e ao cisalhamento do maciço rochoso, sendo a primeira, muito inferior à segunda.

No caso da Figura 1c, a tensão de tração ( $\sigma_t$ ) gerada pelo esforço compressivo ( $\sigma_1$ ), é superior à resistência à tração do maciço rochoso ( $S_t$ ), verificando-se a rutura por tração. Na Figura 1d,  $S_t > \sigma_t$  e por conseguinte, a rutura ocorre através de planos de cisalhamento, desde que satisfeita a condição  $\tau > S_s$ , onde  $\tau$  é a tensão cisalhante gerada por  $\sigma_1$  e  $S_s$  é a resistência ao cisalhamento do maciço rochoso.

Outras situações de rutura, no estado triaxial, podem ser ainda observadas na Figura 1, inclusive com os respectivos gráficos de Mohr, para cada tipo de rutura.

Como pode ser deduzido desses esquemas, as fraturas de tração tendem a ser abertas, enquanto as de cisalhamento, fechadas.

As fraturas de tração são paralelas ao esforço compressivo, correspondendo assim, às fraturas transversais à xistosidade das rochas metamórficas, enquanto as de cisalhamento, formam entre si, um ângulo de  $60^\circ$ , tendo o maior esforço compressivo, como bissetriz desse ângulo. Correspondem pois, às fendas angulares do quadro anterior (ver fotos 1 e 2).

No caso dos granitos e outras rochas não orientadas, a caracterização desses planos de rutura por cisalhamento, serve ainda para identificar a direção do principal esforço compressivo, responsável por esse fraturamento.

O caso das fendas longitudinais abordado no quadro acima e que corresponde às fraturas paralelas à xistosidade, requer uma análise mais específica, visto que foge completamente dos esquemas acima indicados, para a explicação genética dessas deformações.

### 3. - O PROBLEMA PARTICULAR DA FRATURA LONGITUDINAL

Tratando-se de uma fratura paralela à xistosidade e perpendicular ao esforço compressivo, seria de se esperar que fosse normalmente fechada, já que teria sido comprimida por tal esforço. Nessas condições, deveria funcionar como péssimo reservatório de água subterrânea, o que não ocorreu com os dados apresentados, apesar da pequena quantidade desses casos.

Por outro lado, constata-se nos esquemas de rutura da Figura 1, que nenhuma rutura ocorre transversalmente ao esforço compressivo, qualquer que seja o estado de tensões analisado.

A explicação dessa situação, aparentemente anômala, está relacionada com o alívio de tensões que ocorre nos fenômenos epirogenéticos positivos em áreas antigamente submetidas a elevadas tensões compressivas, tangenciais à crosta (processo orogenético).

A Figura 2, foi apresentada por COSTA (1972), para explicar fenômenos semelhantes, que são responsáveis pelos grandes falhamentos da Serra do Mar. Nessa figura, podem ser observadas as variações por que passa o estado de tensões de um maciço rochoso comprimido em profundidade e posteriormente levantado, por força de fenômenos epirogenéticos.

Note-se que, apesar da grande magnitude do estado de tensões, na maior profundidade analisada nesse gráfico, o semi-círculo de Mohr não tangencia a envoltória de rutura do maciço, daí não haver fraturas ou falhas nessa situação. Nesse mesmo gráfico, são mostradas duas situações de ruturas que ocorrem durante o movimento epirogenético: à meia profundidade, a tensão máxima ainda está na horizontal e a fratura ou falha resultante, é do tipo transcorrente (cisalhamento); na zona mais superficial, há um alívio total de uma das tensões horizontais, precisamente na direção correspondente à maior tensão compressiva. Esse alívio é re

sultante do espaço lateral, que aumenta proporcionalmente com o incremento do raio do círculo externo da crosta terrestre, conforme mostra a Figura 2a.

Nessa figura, a tensão de tração, correspondente ao alívio acima referido, é diretamente proporcional à folga criada com o aumento do círculo externo da crosta, de acordo com a seguinte expressão:

$$\sigma_t = \frac{E \cdot \Delta L}{L}$$

Essa é a razão pela qual essas fraturas se desenvolvem perpendicularmente ao esforço compressivo original, pois é nessa direção, em que ocorre o maior alívio de tensões.

O Nordeste Brasileiro é caracterizado por grandes oscilações epirogenéticas, em vastas regiões outrora comprimidas por elevadas tensões tectônicas tangenciais à crosta. Consequentemente, é de se esperar uma significativa ocorrência desse tipo de fraturas de alívio, paralelas à xistosidade dos metamorfitos e que correspondem às fendas longitudinais que tão bons resultados têm apresentado na hidrogeologia do cristalino, apesar de pouco exploradas (ver foto 3).

Convém ainda ressaltar que, o conceito que se tinha desse tipo de fraturas, na época em que foram esses estudos desenvolvidos (1963 a 1966), era o pior possível, pois a falta de correlação dos fenômenos geológicos, à luz dos princípios básicos da mecânica das rochas, impedia de se conceber a verdadeira gênese desse tipo de fratura, que era relacionada a fenômenos compressivos, pelo que, deveriam estar fechadas. Foram portanto naquela época, considerados surpreendentes os bons resultados dos poucos poços locados segundo esse critério, que deixou inclusive, de ser melhor explorado, pela falta de uma exata concepção do fenômeno geomecânico.

#### 4. - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COSTA, W.D. - 1965 - "Análise dos fatores que influenciam na hidrogeologia do cristalino" - Rev. Água Subterrânea, set/dez.- Recife.
- COSTA, W.D. - 1972 - "Contribuição da mecânica das rochas à evolução estrutural da Serra do Mar" - Anais do XXVIº Cong. Brasileiro da SBG - Belém.
- PRICE, N.J. - 1966 - "Fault and Joint Development in Brittle and Semi-Brittle Rock" - Pergamon Press - N.York.

# ESTADOS DE TENSÕES E TIPOS DE RUTURAS

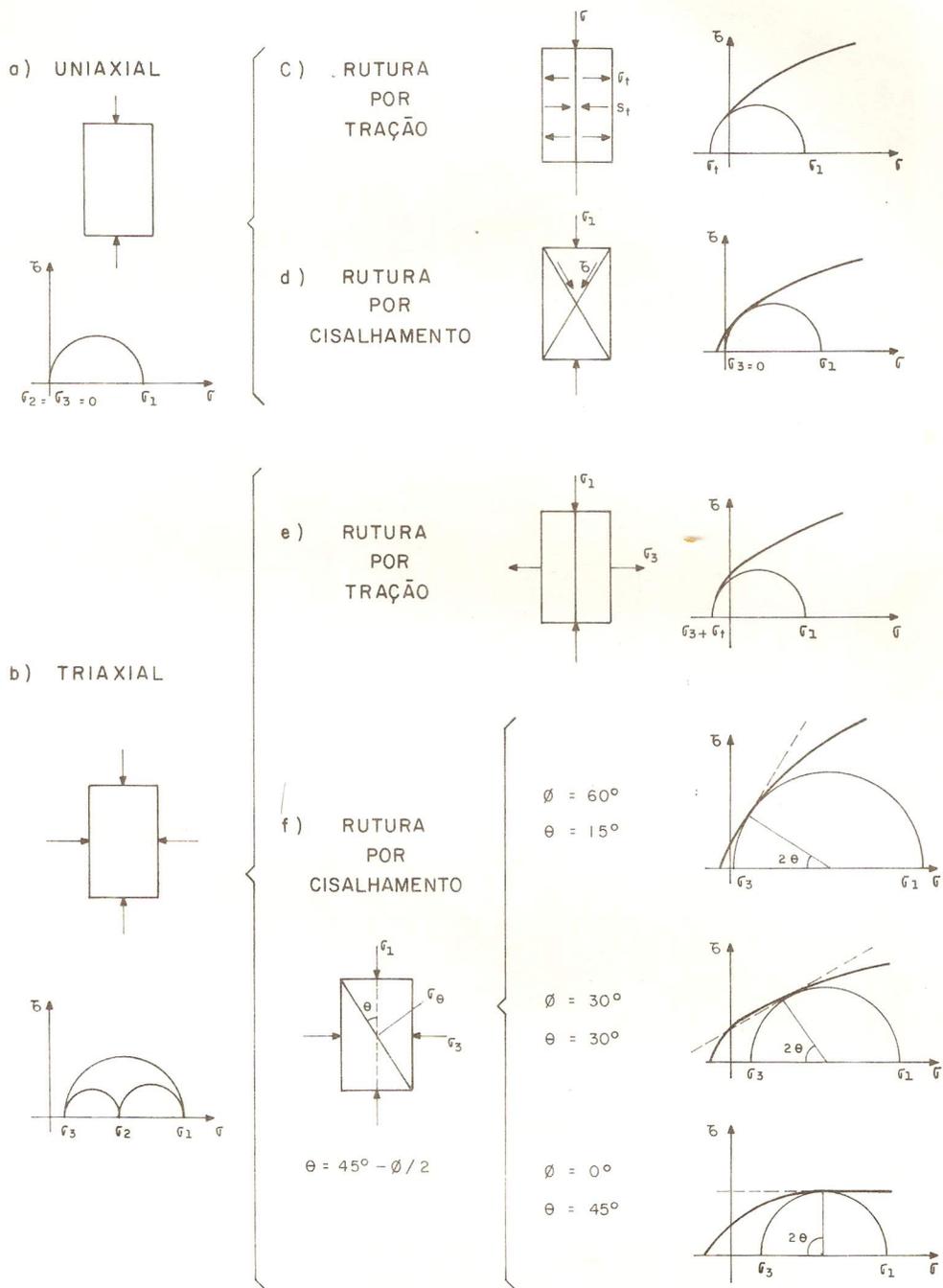


FIGURA 1

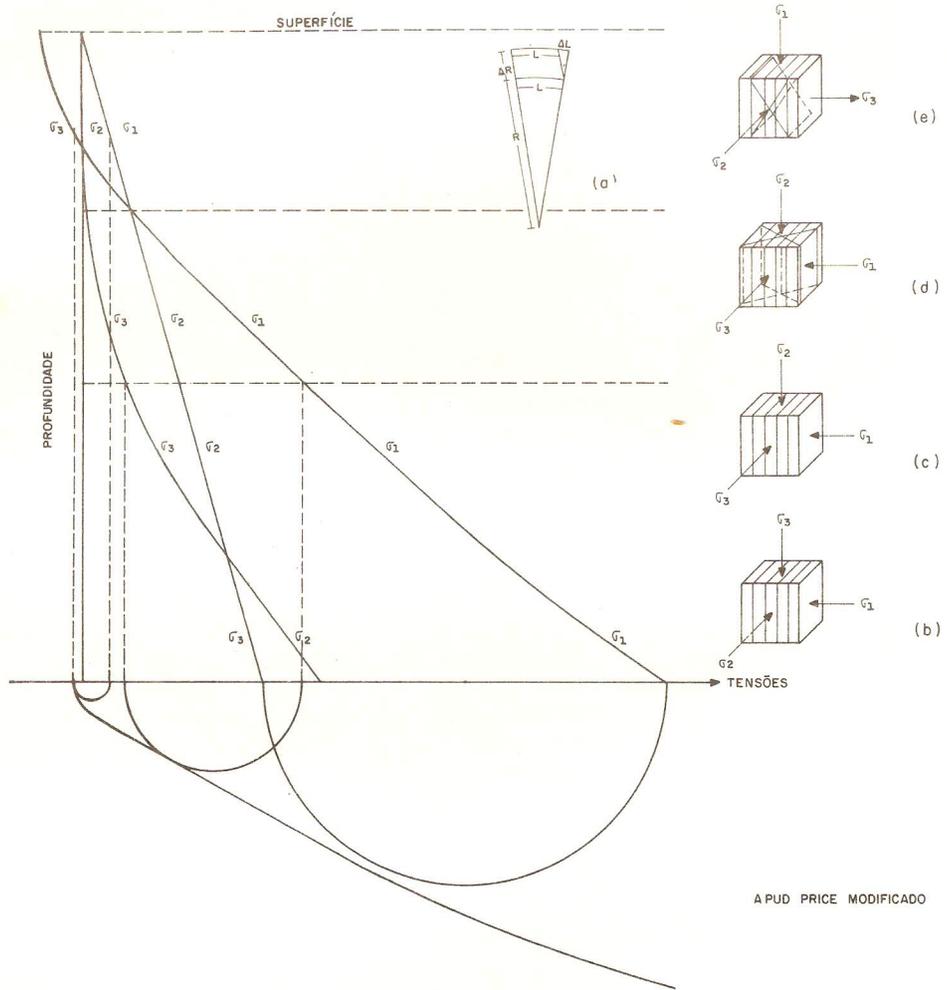


FIGURA 2

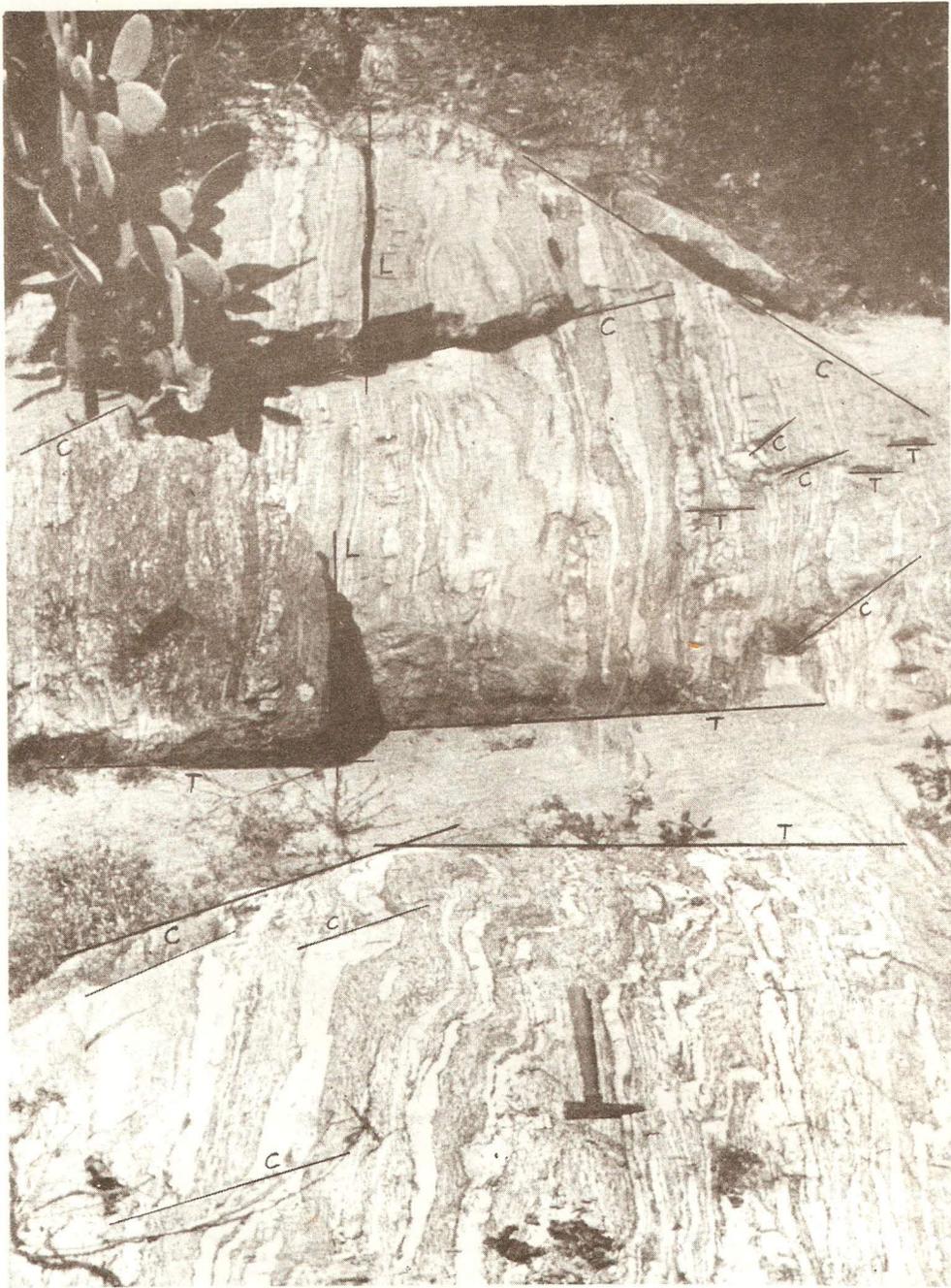


FOTO 1 - Epibolito cortado por três tipos de fraturas. A principal, que ocorre transversalmente à estrutura da rocha e indicada por T, é a mais aberta (tração), sendo inclusive, parcialmente preenchida por material aluvionar. São ainda observadas fraturas angulares ou de cisalhamento (indicadas por C) e longitudinais ou de decompressão (L).



FOTO 2 - Fraturas angulares ou de cisalhamento, observadas em um gnaisse. Note-se que a xistosidade bisecta o maior ângulo formado entre as fraturas, correspondendo à direção da tensão  $\sigma_3$ . As fraturas apresentam-se pouco abertas e sub-verticais.

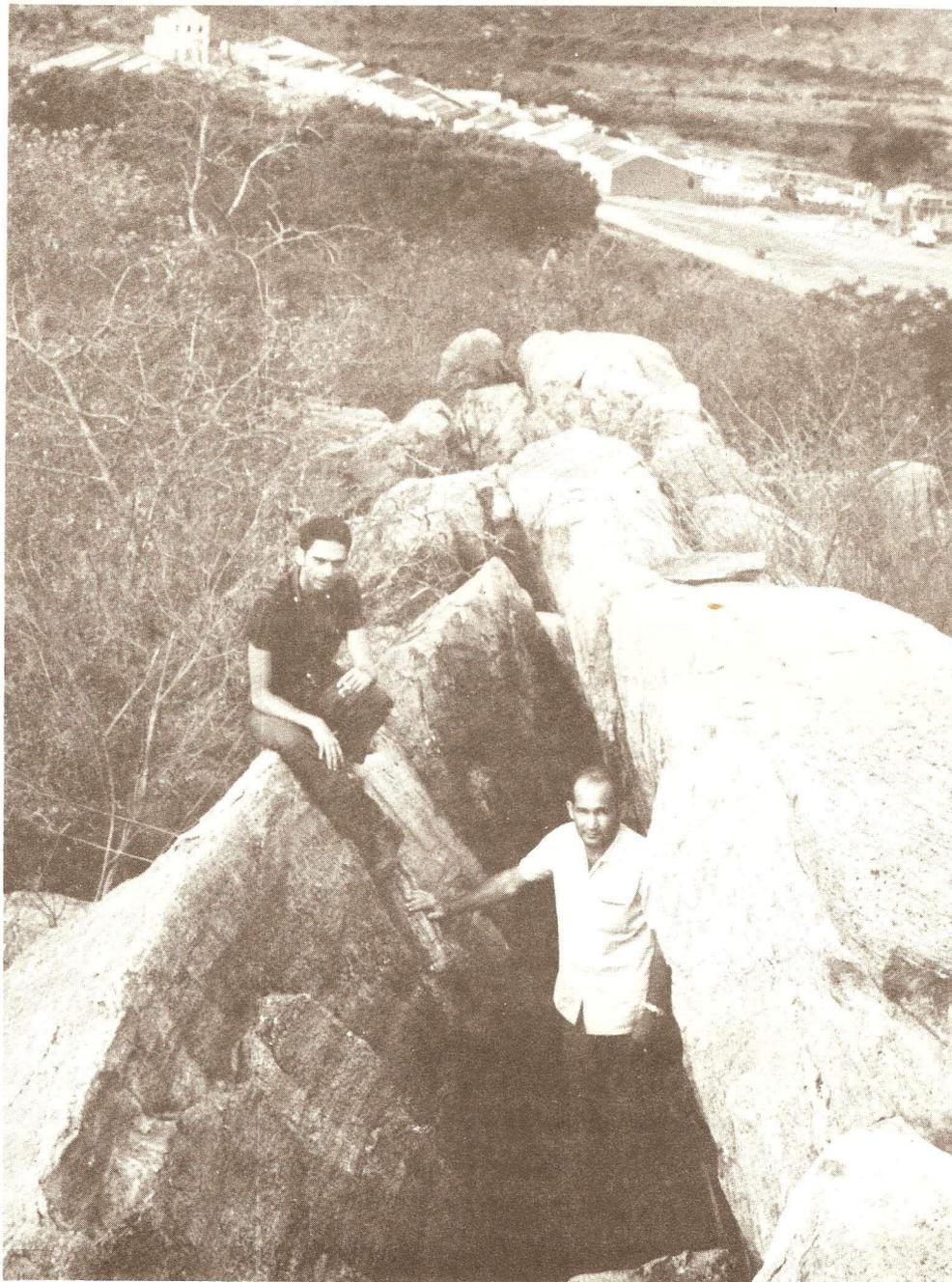


FOTO 3 - Fraturas longitudinais ou paralelas à xistosidade do gnaisse. Observe-se a grande abertura dessas fraturas, como consequência do alívio das tensões compressivas, no sentido perpendicular a esses planos raturais.