

OS MAGMATISMOS CÁLCIO-ALCALINO E PERALCALINO E OS TENSORES DAS DEFORMAÇÕES BRASILIANAS NO CEARÁ.

AFONSO RODRIGUES DE ALMEIDA – DEGEO-UFC
HORST PETER H. G. J. ULRICH – IG-USP

Introdução - Os corpos graníticos tardíos e pós-colisionais se mostram geralmente intrudidos em níveis crustais, cujas profundidades são inferiores a 12 Km. Exemplos são os granitóides Meruoca, Mocambo, Serra da Barriga no Noroeste do Ceará. Nestas porções crustais são comuns os sedimentos e/ou metasedimentos dos facies xistos verdes ou anfibolito (albita-epidoto-anfibolito), cujas temperaturas de formação são características de uma reologia frágil ou dúctil-frágil. Os diques, sejam em enxames ou isolados, são feições petroestruturais particularmente pertinentes a tais ambientes crustais, muito embora Shaw (1980) tenha mostrado que eles podem se formar em níveis tão profundos na litosfera quanto no manto. Estes diques, de modo geral, estão associados a zonas de cisalhamento e exibem geometrias compatíveis com aquelas de fraturas extensionais, que formam ângulos de aproximadamente 135° (horário) com o plano principal de cisalhamento e não apresentam movimento. Estes diques são corpos do tipo Andersoniano, que se posicionaram ao longo de σ_1 e perpendiculares a σ_3 . Assim sendo, eles são o registro natural do elipsóide de esforços que atuaram naquela região, na época de formação daqueles diques. As relações esforço/deformação são bem conhecidas, principalmente quando a deformação é uma zona de cisalhamento, e mais ainda se for do tipo frágil. Estes argumentos são usados neste trabalho para a resolução dos tensores que atuaram no último ciclo orogênico que afetou o Ceará.

A Formação e Propagação de Fraturas Extensionais

Nestas duas últimas décadas, aqueles que pesquisam sobre o emplacement de granitos, tem concentrado a atenção sobre as intrusões ligadas a zonas de cisalhamento. De fato, com uma rápida observação sobre os mapas geológicos, sejam do Nordeste ou de qualquer parte do Brasil, o leitor vai concluir que a grande maioria dos corpos graníticos estão em, ou associados as zonas de cisalhamento. Dentro os vários modelos propostos (vide Hutton 1988a ; 1992), uma atenção especial é dada ao emplacement de magmas graníticos em fraturas extensionais (Castro 1986; Almeida 1995).

A prática de campo tem mostrado que dentre as teorias de formação de fraturas aquela concebida por Griffith (1921, 1925) é a que melhor se aplica para rochas crustais e é a mais representativa para rochas parcialmente fundidas (Shaw, 1980). A teoria de Griffith se refere a um método de análise baseada no balanço de energia envolvida no crescimento (propagação) de uma fratura existente. O fato de que muitas rochas e minerais contém microfraturas e imperfeições de vários tipos, torna esta teoria um ponto de partida lógico para a discussão sobre a propagação de fraturas, particularmente para rochas que contém uma fase fluida, seja na forma de filmes intergranulares ou como um plexo de fraturas preenchidas por fluidos.

Uma maneira particularmente conveniente de representar as condições de esforços para o fraturamento, é por meio de um envelope de "esforço" para ruptura sobre um diagrama de Mohr (Fig. 1). A forma deste envelope é definida por Secor (1965), como segue:

$$\tau^2 - 4K\theta - 4K^2 = 0\tau$$

As relações entre os "esforços" cisalhante e normal e o "tensile strength" — K são mostrados na (Fig. 1), extraída de Secor (1965). Nesta figura pode ser visto que o "esforço" cisalhante para $\sigma = 0$ é dado por:

$$\tau_0 = 2K$$

e o "tensile strength" é por isso — $K = \tau_0/2$. Em valores de "esforços" superiores a $2K$ o envelope é assumido ser linear conforme a lei de Coulomb (veja equação sobre a Fig. 1.b). Por isto este diagrama é referido como sendo um diagrama composto, no qual são identificados regimes de fraturas desde extensionais puras a fraturas de cisalhamento puro.

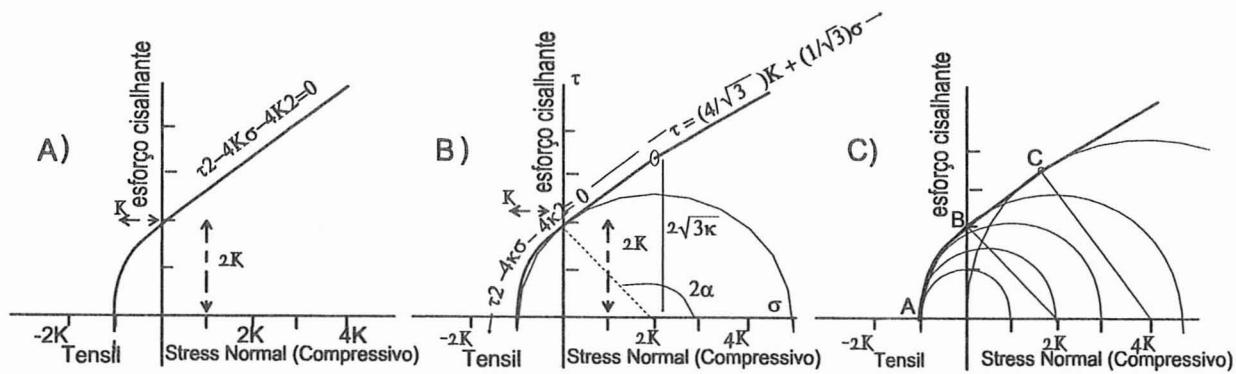


Figura.1 - Diagramas de Mohr composto ilustrando as leis de fraturas de Griffith e Griffith mais Coulomb. Diagrama A mostra a forma parabólica do envelope de Griffith e as relações dos interceptos sobre os eixos (σ e τ). O diagrama B mostra o envelope composto e as equações das porções linear e parabólica. O diagrama C mostra uma família de círculos de Mohr.

Na figura (1c), há um “locus” de pontos ($\tau; \sigma$) e (A, B) onde teoricamente as fraturas extensionais podem ocorrer. Os círculos tangentes em A, teoricamente dão fraturas extensionais puras, ao longo de planos que fazem 90° com σ_3 . Os círculos tangentes entre os pontos A, B e C envolvem teoricamente ângulos α de fraturas decrescentes desde 90° até cerca de 70° com relação ao eixo σ_3 . O círculo tangente ao ponto C, está centrado em $+4\text{ K}$ com $\sigma_1 = 8\text{ K}$ e $\sigma_3 = 0$ e marca uma posição no envelope, além do qual a abertura de fratura, qualquer que seja o material (teoricamente), não pode ocorrer.

A teoria de Griffith tem como base principal de sustentação, a presença de fases fluidas nas microfraturas e/ou nas imperfeições dos minerais. Se a magnitude da pressão de fluidos ou pressão do magma (P_f) é igual à pressão litostática ambiente, as fraturas somente se abrirão se o “esforço” normal à superfície da fratura for tensil. Em outras palavras, quando $P_f = P_{lit.}$, a injeção de magma só pode ocorrer se os valores dos “esforços” corresponderem a aquela parte negativa do envelope de Mohr (Fig. 1.c). Esses estados de esforços correspondem ou a formação de fraturas extensionais perpendiculares ao eixo do “esforço” principal mínimo, ou a um conjugado de fraturas de cisalhamento inclinadas com relação aos “esforços” principais, de forma tal que o ângulo agudo da intersecção das fraturas conjugadas é bissecado pela direção de σ_{1eff} (sigma um efetivo, Fig. 2).

Na figura 2 são mostradas as geometrias das principais deformações associadas às zonas de cisalhamento. Em parte, ela é o resultado de estudos experimentais realizados por H. Cloos & W. Riedel em (1928 e 1929, in Almeida 1995). Estas deformações são:

- 1) Formação de pequenas fraturas conjugadas R e R', fraturas estas denominadas de Riedel, que fazem ângulos de aproximadamente $\theta/2$ com as direções teóricas do cisalhamento (Fig. 2).
- 2) Formação de fraturas T extensionais que se desenvolvem por tração indireta a cerca de 45° (anti-horário) com a direção do cisalhamento principal. Conforme Shaw (1980), tais fraturas podem formar ângulos de até 25° com a direção principal de cisalhamento, entretanto, neste caso a fratura apresenta uma componente cisalhante, além é claro, da componente extensional.

O Magmatismo Cálcio-Alcalino e os Tensores nas Regiões Central Ceará no Brasiliano.

Em regimes deformacionais resultantes da colisão continente – continente, o magmatismo cálcio-alcalino marca o estágio tardio a pós-colisional (Harris et al 1986). No Ceará, vários são os corpos graníticos cálcio-alcalinos encontrados ao longo de zonas de cisalhamento. Dentre eles os batólitos Quixeramobim, Senador Pompeu e Serra Azul ao longo da zona de cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP) e Pedra Lisa e Nova Russas ao longo da zona de cisalhamento Tauá (ZCT) (Almeida, 1995).

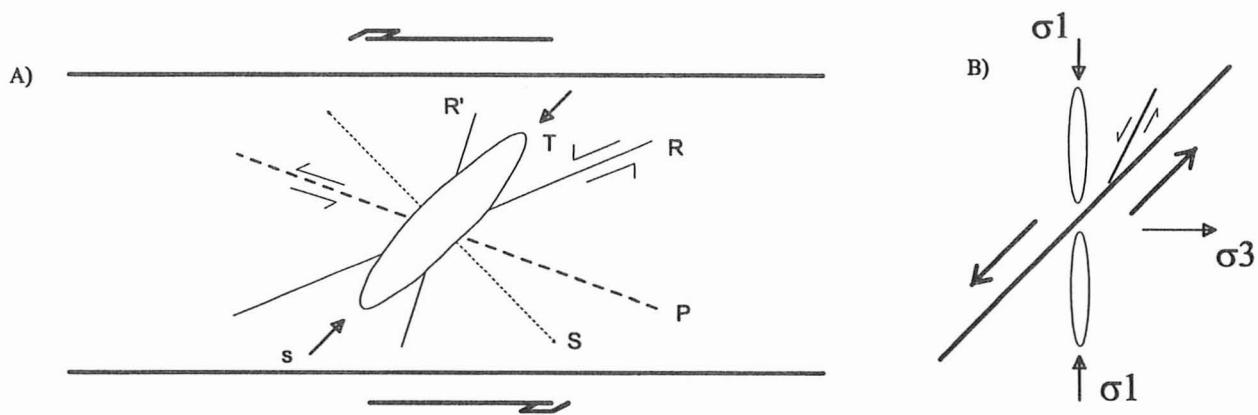


Fig. 2) - Geometria de feições secundárias associadas a zonas de cisalhamento dúcteis (cf. Blés & Fenga 1981): (A). Par de zonas de cisalhamento sinistrais; As fraturas extensionais T, em ângulos retos com sigma 3, podem estar acompanhadas por fraturas Riedel (R) e Skempton (P). As fraturas antitéticas Riedel (R') também são mostradas. Uma xistosidade S está desenvolvida em ângulo reto com a direção de sigma 1. (B) Uma zona de cisalhamento sinistral, mostrando a posição das fraturas extensionais e Riedel.

A geometria desenhada pelas zonas de cisalhamento Tauá (ZCT), em conjunção com a zona de cisalhamento Senador Pompeu (ZCSP), requer para sua formação, um esforço principal máximo (σ_1) horizontal, aproximadamente N-S, um esforço principal mínimo (σ_3) horizontal, aproximadamente E-W e (σ_2) vertical (Fig 3, A1), com uma movimentação desstral para a ZCT (N20W) e uma movimentação sinistral para a ZCSP (N40E). Este desenho é compatível com a geometria dos corpos cálcio-alcalinos com relação as zonas de cisalhamento (ZCs), sugerindo que eles ascenderam na crosta através de fraturas extensionais desenvolvidas durante esta movimentação sinistral da ZCSP e desstral da ZCT (Figs 3 A2, A3 e A4).

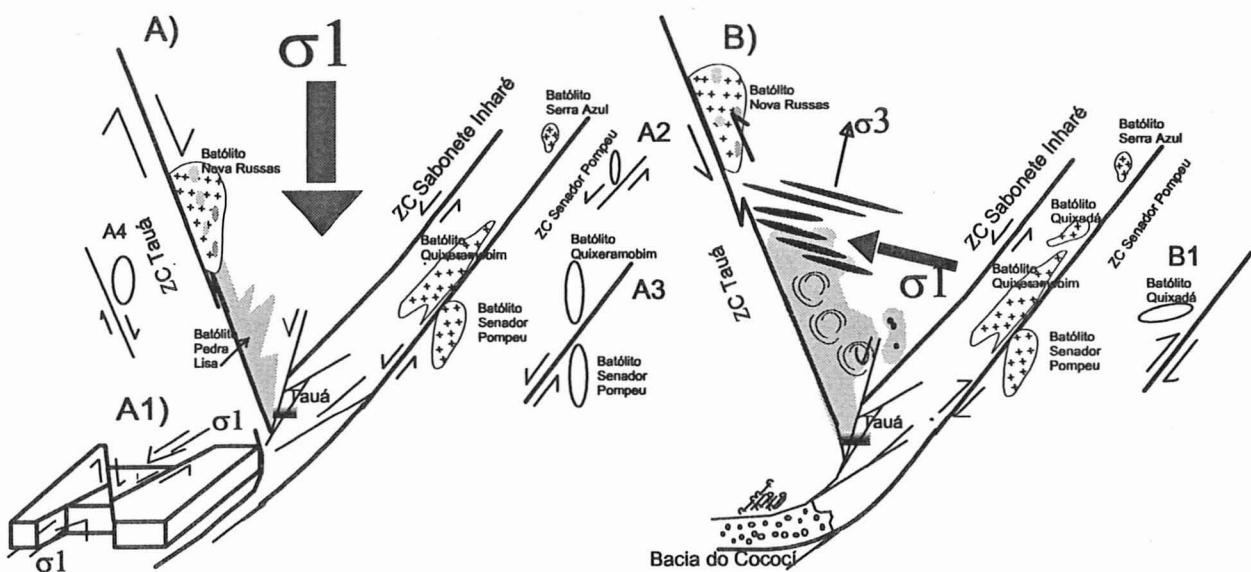


Figura 3- Mapa geológico esquemático da região sudoeste do Ceará, exibindo as principais feições estruturais naturais e modelos aplicados. (A1) Formação de zonas de cisalhamento por esforço compressivo σ_1 N-S. A2, A3 e A4 modelos teóricos de fraturas associadas a zonas de cisalhamento aplicado ao emplacement dos granitos cálcio-alcalinos tardí-colisionais. No estágio pós-colisional, inversão no campo de esforços com (σ_1 E-W como evidenciado por diques de Tauá.

Magmatismo Peralcalino e os Tensores nas Regiões Sudoeste e Noroeste

O deslocamento das massas cratônicas São Francisco em direção ao craton São Luis (Oeste Africano), propiciou uma inversão no campo de esforços principais, agora com (σ_1 horizontal E-W e (σ_3 horizontal N-S e (σ_2 vertical (Figs. 3 a e b). Estes esforços foram absorvidos pelas principais zonas de cisalhamento, invertendo seus movimentos anteriores. Aquelas anteriormente sinistrais agora se movimentaram destralmente (caso da ZCSP, Sobral-Pedro II, etc). No caso da ZC Senador Pompeu, este movimento destral propiciou a formação de fraturas extensionais que foram aproveitadas para a instalação do batólito shoshonítico Quixadá (Fig. 3B1). A ZC Tauá, anteriormente destral, agora se movimentou sinistralmente propiciando a formação de fraturas extensionais (N110), que foram utilizadas para a instalação dos enxames de diques Tauá e Independência, constituidos principalmente por rochas peralcalinas (Almeida 1987).

A reativação destral da ZC Sobral-Pedro II (N40°E) propiciou a formação de fraturas extensionais que foram utilizadas para a instalação dos enxames de diques de Aroeiras (Fig. 4 a) e Coreaú, ambos com direção N80°E. Uma forte componente transtensional (Fig. 4b), possibilitou o desenvolvimento “pull apart” da bacia Jaibaras. A abertura da bacia (N40°E) induziu um deslocamento de massa crustal ((1) no sentido N-S, resultando na formação de fraturas extensionais de direção N-S, que foram aproveitadas para a instalação do enxame de diques de Macaraú (Fig. 4c).

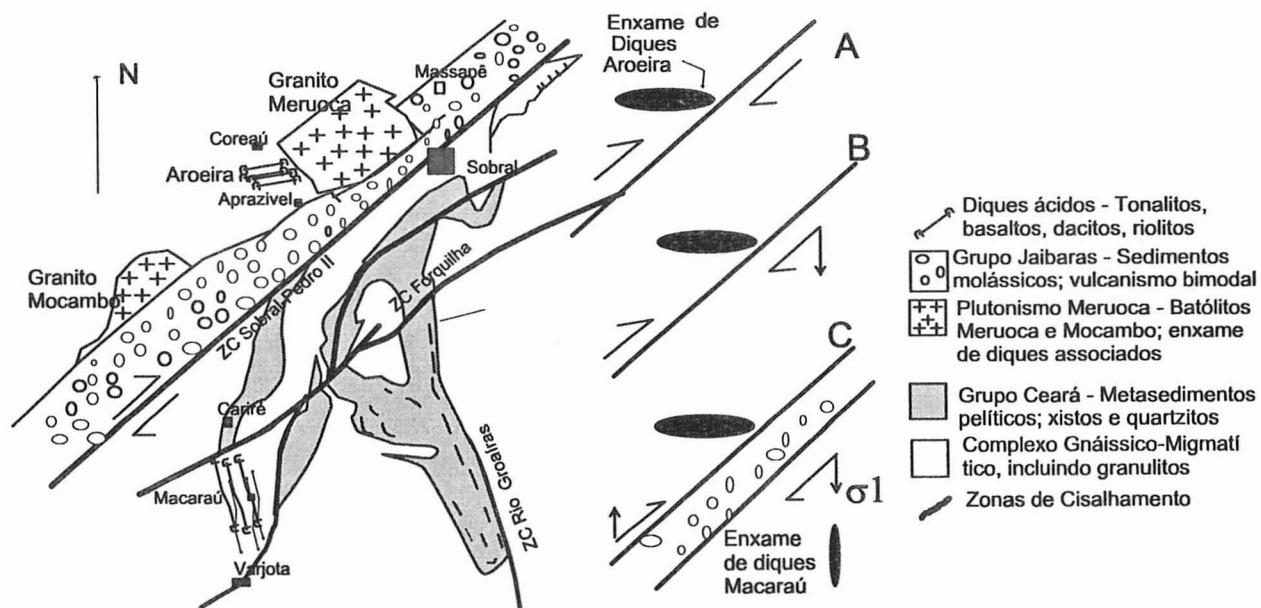


Figura 4 – Mapa esquemático da região noroeste do Ceará, destacando os enxames de diques de Aroeiras e Macaraú, e modelos teóricos de fraturas extensionais (4 A, 4B e 4C).

DISCUSSÃO

Foliações com baixo ângulo de mergulho (Pessoa et al 1984), gradiente metamórfico invertido e megazonas de cisalhamento (Caby et al 1986), são feições onipresentes no Estado do Ceará que indicam uma estruturação tectônica horizontal, decorrente de esforços compressivos. A geometria desenhada pelas zonas de cisalhamento NE (geralmente N40°E) e NW (geralmente N20°W), como mostrado na Fig. 3, requer a atuação de um esforço principal máximo (σ_1) horizontal de direção N-S, um esforço principal mínimo (σ_3) horizontal de direção E-W e um esforço intermediário (σ_2) vertical. Esta direção é compatível com aquela requerida para a formação das fraturas extensionais que abrigam os principais corpos

graníticos cálcio-alcalinos (Fig. 3 A1, A2, A3 e A4). Como em outras regiões do mundo (Harris et al 1986), o “emplacement” destes corpos caracteriza o estágio tardi-colisional brasileiro.

Os granitóides cálcio-alcalinos, que ocorrem ao longo das ZCs de direção NE, exibem uma deformação dúctil “post-full crystallization”, cujos indicadores cinemáticos indicam uma movimentação destral. Aqueles que ocorrem ao longo das ZCs NW, exibem deformação “post-full crystallization” que denotam uma última movimentação dúctil sinistral. Estes indicadores sugerem uma reativação induzida por tensores cujo esforço principal máximo (σ_{1H}) tem direção aproximada E-W, um esforço principal (σ_{3H}) mínimo N-S e um esforço principal intermediário (σ_2) vertical. Estes tensores são compatíveis com aqueles relacionados com a abertura do sistema de fraturas extensionais ocupadas pelos enxames de diques lineares Coreaú, e de Tauá e Independência, cujas rochas peralcalinas indicam um estágio pós-colisional brasileiro. As direções propostas para os tensores, em ambos os casos, não leva em conta a rotação da placa sul-americana pós-gondwana.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. R. -1995- Petrologia e aspectos tectônico do Complexo Granítico Quixadá-Quixeramobim-CE. IGUSP, Tese de Doutoramento, inédito.
- ALMEIDA, A.R. -1987- Petrologia da província subvulcânica de Tauá e Independência - CE. Dissertação de Mestrado, UFPE, Recife-PE. Inédito.
- ALMEIDA, A.R.; SIAL, A.N. & FERREIRA, V.P. -1984- Petrologia e geoquímica de alguns enxames de diques Cambrianos do Nordeste. Atas do X Simp. Geol. do Nordeste, Natal-RN; 60-76.
- CABY, R. & ARTHAUD, M.H. -1986- Major Precambrian nappes of the Brazilian Belt, Ceará, Northeast Brazil. Geology; 14, 871-874.
- CASTRO, A. -1986- Structural pattern and model ascent in the Central Extremadura batholith, Hercinian Belt, Spain. Jour. Struc. Geol. 8, 633-645.
- CLOOS, H. -1955- Experimental analysis of fracture patterns. Bull. Geol. Soc. Am.; 66, 241-256.
- HARRIS, N. PEARCE, J. & TINDLE, A. -1986- Geochemical characteristics of collision-zone magmatism. In: Collision Tectonics, Blackwell Scientific Publications, Oxford. 67-81.
- HUTTON, D.H.W- 1988- Granite emplacement mechanisms and tectonic controls: inferences from deformation studies. Trans. Royal Soc. Edinburgh: Earth Sci.; 79, 245-255.
- HUTTON, D.H.W. -1992- Granite sheeted complexes: evidences for the dyking ascent mechanism. Transactions of the Royal Society of Edinburg; 83a, (in press).
- PESSOA, R.R. & ARCHANJO, C.J. -1984- Tectônica de empurrões na região de Tróia-CE. XXXIII Cong. Bras. Geol.; 1721-1728. CAVALCANTI, J.C.; FERREIRA, C.A.; RAMALHO, R.; BRAUN, R.P.G.; BATISTA, M.P & CUNHA, H.C.S. - 1983- Mapa Geológico do Estado do Ceará; Escala 1:500.000; MME/DNPM/CEMINAS/SUDENE, Fortaleza.
- PESSOA, R.R. & ARCHANJO, C.J. -1984- Tectônica de empurrões na região de Tróia-CE. XXXIII Cong. Bras. Geol.; 1721-1728.
- SECOR, D.T.-1965- Role of fluid pressure in jointing. Am. Jour. Sci.; 263, 633-646.
- SPERA, F. -1980- Aspects of magma transport. In: HARGRAVES, R.B. (Eds.). Physics of Magmatic Processes. Princeton University Press., Princeton. 265-324.

GRANULITOS CHOROZINHO-CE.: Evidências de descompressão em rochas eclogíticas.

AFONSO RODRIGUES DE ALMEIDA - DeGeo-UFC
JOSÉ DE ARAÚJO NOGUEIRA NETO - DeGeo-UFC

O Estado do Ceará tem na literatura geológica especializada pelo menos três unidades litoestratigráficas que ainda são pouco conhecidas, mas comumente citadas. Elas são o Complexo Pedra