

A SUÍTE MAGMÁTICA AROEIRAS – SOBRAL-CE: PETROLOGIA, MECANISMO DE EMPLACEMENT E POSIÇÃO ESTRATIGRÁFICA

*Afonso Rodrigues de Almeida¹
José Ferreira de Andrade Filho¹*

Abstract

The Aroeira magmatic suite is an association of subvolcanic rocks which outcrop along the Aprazível – Coreaú road, mainly around Aroeira village. The rocks form linear dykes trending N80°E, with decimetric to decametric widths, but most frequently around 5 m. The rock types include basalt, quartz andesite, quartz diorite, dacite, rhyodacite, rhyolite, alkali-feldspar rhyolite and alkali-feldspar microgranite. The basalts occur as dykes or as inclusions in the other rock types.

Intermediate to acid rocks with SiO₂ between 57% and 74% are common, and the more siliceous types predominate. They have FeO/Fe₂O₃ ratios > 1, very low TiO₂, MnO and MgO, and relatively high Na₂O and K₂O contents. Three samples have normative corundum, of which one high value may be the result of partial leaching of the alkalis, or to the presence of a large quantity of biotite and only small quantities of feldspars. A silica gap between the basic and intermediate rocks and the more acid types may imply that two magmas were present.

The δ¹⁸O values for Aroeira rocks range between +8.54‰ and +11.10‰, with six of the eight results (those for the acid rocks) above 10.00‰. Although these results could mean that basic and acid rocks have different sources, late-stage alteration (sericitization, chloritization, kaolinization) may have modified the primary ratios.

The geometrical relationships between the extensional fractures and the Sobral – Pedro II shear zone clearly demonstrate the the emplacement of the Aroeira dykes took place under the influence of right-handed (dextral) movements which resulted from an E-W oriented maximum tensor which acted just before the dextral transtensional movements which lead to the opening of the Jaibaras basin. The Aroeiras dykes are therefore older than the volcano-sedimentary fill of this basin.

Résumé

La suite magmatique Aroeiras est constituée par une association de roches sub-volcaniques qui affleurent le long de la route Aprazível-Coreau et dont la concentration principale se trouve dans le district de Aroeiras. Ces roches forment des essaims de dykes linéaires de direction N80E dont l'épaisseur varie de décimétrique à décamétrique avec une moyenne autour de 5 m. Basaltes, quartz-andésite, quartz-diorite, dacite, rhyodacite, rhyolite et microgranites à feldspaths alcalins sont les lithotypes rencontrés. Les basaltes se présentent ou sous la forme de dykes ou d'enclaves microgranulaires dans les autres roches de la suite.

¹ Universidade Federal do Ceará – Departamento de Geologia – almeida@ufc.br

Les roches qui constituent la Suite Aroeiras varient entre intermédiaires et acides, avec une prédominance de ces dernières qui montrent des valeurs de SiO₂ qui varient entre 57 et 74%. Les proportions FeO/Fe₂O₃ sont supérieures à 1. Elles montrent des teneurs très basses en MgO, TiO₂ et MnO et des teneurs relativement élevées en K₂O et Na₂O. Trois échantillons sont à corindon normatif et un d'eux (D-7) montre une valeur relativement élevée de corindon. Cependant, la peraluminosité élevée des échantillons peut provenir d'une lixiviation des alcalis, comme le montre la grande quantité de micas sur les feldspaths. Les "gap" de SiO₂ suggèrent la coexistence de deux séries magmatiques, une basique/intermédiaire, ici représentée seulement par les termes intermédiaires, et une autre acide.

Les valeurs de δ¹⁸O montrées par les roches Aroeiras varient entre + 8,54% et + 11,10%, huit des valeurs en question se trouvant au delà de 10%. On peut également observer que les δ¹⁸O augmentent progressivement vers le sud. Ces données isotopiques d'oxygène sont compatibles avec une source mantéllique pour la suite basaltique représentée par les échantillons D-23 et D-16 et avec une source crustale pour les autres échantillons qui appartiennent à la suite rhyolitique. D'un autre côté, nous observons, en analyse microscopique, des signes d'altération résultants de l'interaction avec les eaux météoritiques qui est mise en évidence par une séricitisation, une kaolinisation et une chloritisation.

La combinaison géométrique des éléments structuraux, fractures linéaires et zone de cisaillement, montre que la mise en place des dykes a été produite par un mouvement dextre causé par un tenseur principal de direction est-ouest immédiatement avant les mouvements en transtension qui ont provoqué l'ouverture du bassin de Jaibaras. Les magmas Aroeiras sont donc antérieurs à la déposition des sédiments et volcanites intercallés qui remplissent le Graben Jaibaras.

Resumo

A suíte magmática Aroeira está constituída por uma associação de rochas magmáticas sub-vulcânicas que ocorre ao longo da rodovia Aprazível – Coreauí, tendo sua concentração máxima no distrito de Aroeiras. Estas rochas constituem enxames de diques lineares de direção N80E, cujas espessuras variam desde decimétricas a decamétricas, sendo aqueles de aproximadamente 5 m, os mais freqüentes. Basaltos, quartzo-andesitos, quartzo-dioritos, dacitos, riocacitos, riolitos, álcali-feldspato-riolitos e álcali-feldspato-microgranito são os litotipos encontrados. Os basaltos ocorrem sejam como diques ou como enclaves microgranulares inseridos nos demais litotipos da região.

As rochas que compõem a suíte Aroeiras variam de intermediárias a ácidas, com dominância destas últimas, exibindo valores de SiO₂ variando de 57% a 74%. As razões FeO/Fe₂O₃ são maiores que 1. Elas exibem teores muito baixos de MgO, TiO₂ e MnO, e teores relativamente altos de K₂O e Na₂O. Três amostras são coríndon normativas, com uma delas (D7) apresentando um valor relativamente alto de coríndon, entretanto, a peraluminosidade apresentada pela amostra pode se dever a uma lixiviação de álcalis, como mostrado pela grande concentração de mica sobre os feldspatos. Os "gaps" em SiO₂ sugerem, a coexistência de duas séries magmáticas, uma básica/intermediária, aqui representada apenas pelos termos intermediários, e outra ácida.

Os valores de δ¹⁸O exibidos pelas rochas Aroeiras variam entre +8,54‰ e +11,10‰, estando seis dos oito valores em questão, acima de 10‰. Observa-se, além disso, que os valores de δ¹⁸O, crescem gradualmente de norte para sul. Estes dados de isótopos de oxigênio estão francamente compatíveis com uma fonte mantélica para as amostras da suíte basáltica representada pelas amostras D-23 e D-16 e com uma fonte crustal para as demais amostras pertencentes à suíte riolítica. Por outro lado, nos

observamos durante as análises microscópicas, sinais de alteração resultantes da interação com água meteórica. Estas estão ressaltadas pelos fenômenos de sericitização, caolinização e cloritização.

A combinação geométrica dos elementos estruturais fraturas lineares mais zona de cisalhamento, deixa claro que o emplacement do enxame de diques Aroeiras se fez em função do movimento dextral causado por um tensor principal máximo de direção este – oeste, em época imediatamente anterior aos movimentos transtensionais destrais que originaram a abertura da bacia. Os magmas Aroeiras são, portanto, anteriores à deposição dos sedimentos e vulcanitos intercalados que preenchem o graben Jaibaras.

Introdução

O graben Jaibaras está exposto na região noroeste do Ceará, com área aflorante estendendo-se desde o sopé da serra da Ibiapaba, no município de Pacujá, passando pelo município de Sobral, até o município de Morrinhos, onde esconde-se por sob os sedimentos que constituem o tabuleiro litorâneo numa extensão de cerca de 110km. Ele desenvolveu-se ao longo do lineamento transcontinental Sobral-Pedro II, que limita dois grandes domínios litoestruturais (microplacas?), quais sejam: o Domínio Médio Coreaú a oeste do lineamento e o Domínio Ceará Central, a leste do lineamento.

No Ceará, a partir de Fortaleza, o acesso a este segmento do graben, pode ser feito através da rodovia asfaltada BR-222 até o município de Sobral, que se situa em sua porção mediana. A região mostra boas condições de acesso, com vilas e cidades com excelente infra-estrutura.

Os litotipos que constituem o Grupo Jaibaras estão alocados principalmente ao longo do graben Jaibaras, delimitados a leste pela zona de cisalhamento Sobral-Pedro II e a oeste pela zona de cisalhamento Café-Ipueiras. O tipo de sedimentação foi terrígena na base, sob a forma de um cone aluvial (conglomerados da Formação Massapê), seguido de canal fluvial (arenitos de parte da Formação Pacujá) e planície aluvial (arenitos lamosos e lamitos também da Formação Pacujá), Mello (1978). Intimamente relacionado com os processos de extensão crustal que geraram a abertura do graben Jaibaras são encontradas suites magmáticas anorogênicas. Este magmatismo marca todos os estágios da evolução deste proto-rift.

A denominação Formação Parapuí foi originalmente usada por Costa et al (1973), para abranger “*uma complexa suíte de rochas vulcânicas, incluindo extensos derrames de lavas, elementos piroclásticos e termos subvulcânicos representados por diques e sills. Petrograficamente correspondem, a basaltos, andesitos, dacitos e riolitos, geralmente espilitizados e queratofirizados, além de gabros, diabásios, dacitos e riolitos porfiríticos. O nome proposto refere-se a vila homônima, situada às margens do rio Acaraú, próximo a terminação (conhecida no Ceará) setentrional do graben, em torno da qual ocorre um dos mais representativos exemplos dos derrames de lavas espiliticas, tão característicos deste vulcanismo*”.

Para posicionar estratigraficamente estes corpos ígneos com relação aos sedimentos que os encaixam, nós dividimos a Formação Parapuí em 3 suites: 1. A suíte Aroeiras que inclui os enxames de diques lineares que ocorrem ao longo da rodovia Aprazível-Coreaú, 2. a Suíte Parapuí que inclui os derrames basálticos e riolíticos e seus derivados e equivalentes plutônicos e 3. a Suíte Meruoca-Mucambo, que inclui os plutões Meruoca e Mucambo. Este trabalho versa sobre o magmatismo Aroeiras, levando em consideração a sua petrografia, geoquímica, colocação e posição estratigráfica.

A Suíte Aroeiras – Petrografia

Esta suíte está constituída por uma associação de rochas magmáticas sub-vulcânicas que ocorre ao longo da rodovia Aprazível – Coreaú, tendo sua concentração máxima no distrito de Aroeiras. Estas rochas constituem enxames de diques lineares cujas espessuras variam desde decimétricas a decamétricas, sendo aqueles de aproximadamente 5 m, os mais frequentes. Alguns deles, em função de sua possança, constituem verdadeiras muralhas naturais, que se alongam segundo uma direção aproximada N80E, por até 15 Km em afloramentos descontínuos, indicando que estes magmas ocupam fraturas de natureza “en échelon”.

A grande variedade de litotipos que compõe este enxame de diques, a primeira vista, sugere que estes possam não estar relacionados, entretanto, a atitude estrutural única observada para estes corpos, nos diz que eles são resultantes da atuação do mesmo campo de esforços principais, sendo portanto, temporal e geograficamente associados e que podem estar genéticamente relacionados.

A figura 2 mostra a suíte Aroeiras constituída por duas séries de rochas que se alinham ao longo de um trend similar ao de suítes cálico-alcálicas de médio K, entretanto os gaps composicionais exibidos não permitem caracterizá-la como tal. Aí são encontrados basaltos, quartzo-andesitos, quartzo-dioritos, dacitos, riocacitos, riolitos, álcali-feldspato-riolitos e álcali-feldspato-microgranito. Riolitos e micro-granitos estão classificados com base textural, os riolitos sendo afaníticos e os granitos faneríticos, ambos podendo ocorrer em um mesmo dique.

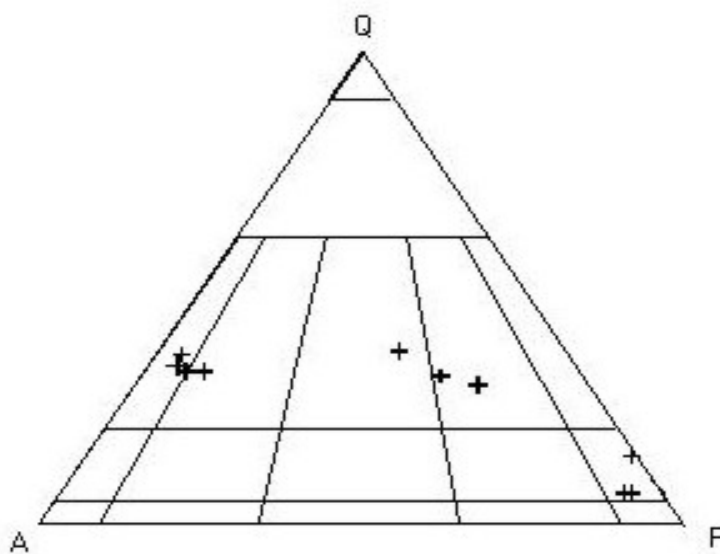


Figura 1 – Diagrama Quartzo-Álcali-Feldspato-Palgioclásio de A Streckeisen (1976) exibindo a variação composicional encontrada na Suíte Aroeiras. Notar os “gaps” composicionais.

Os *basaltos* ocorrem sejam como diques ou como enclaves microgranulares inseridos nos demais litotipos da região. Os diques basálticos são sempre de pequena espessura, nunca superando a marca de um metro. Isto faz com que eles passem praticamente despercebidos, sendo comum eles ocorrerem na forma de pequenos blocos acebolados em pequenas aglomerações, jamais formando relevo. Estas rochas se mostram afaníticas, maciças, com cor cinza-claro,

pontuadas por microfenocristais de plagioclásio que se mostram em ripas milimétricas, dispersas heterogeneamente, em volumes que só ocasionalmente chegam a 5%. Algumas vesículas podem ser observadas, algumas delas estando parcialmente preenchidas por quartzo. A matriz está composta essencialmente por ripas de plagioclásios dispostos de maneira sub-óptica, com os espaços intersticiais ocupados por clorita e actinolita-tremolita, resultantes da decomposição de clinopiroxênios que ocorrem em cristais reliquiais, epidoto e minerais óxidos de ferro. Não foram encontrados cristais de olivina.

Os *quartzo-dioritos* constituem talvez o maior dos corpos tabulares ali encontrados. Sua espessura chega a cerca de 50m, alongando-se por cerca de 15km em Afloramentos descontínuos “en échelon”, localmente constituindo serrotes, como o da Cachoeira, p.ex.. A rodovia Aprozível-Coreaú o intercepta na fazenda Mucambo, entretanto, há citações deste corpo “*a meia altura e ao sopé da ladeira de Tianguá*” Kegel et al. (1958). São rochas de granulação fina, cor cinza-clara, salpicada por pontuações escuras, definidas por “clots” biotíticos. São freqüentes os enclaves, sejam eles microgranulares, autólitos e/ou xenólitos. Os enclaves microgranulares são centimétricos, arredondados, de granulação fina por vezes afanítica, cor escura, maciços de composição diorítica. Os autólitos exibem mineralogia similar aquela da rocha encaixante, entretanto, sua granulação é normalmente mais grossa que a do seu hospedeiro, estando aí a principal diferença com relação aos enclaves microgranulares. Os xenólitos são constituídos basicamente por arenitos de cor creme, oriundo da Formação Coreaú, que abriga grande parte da Província subvulcânica Aroeiras. Ao microscópio exibem textura intergranular, diorítica, definida pelo arranjo de feldspatos plagioclásicos de composição andesínica, que ocasionalmente se mostram mais desenvolvidos constituindo uma textura porfirítica. Intersticial aos plagioclásios, encontramos hornblenda verde, biotita que forma glomeropórfiros, quartzo, microclina, apatita, titanita, allanita, zircão e minerais óxido de ferro. As hornblendas se mostram em cristais euedrais a subedrais parcialmente transformados para biotita e/ou clorita. Muitas vezes se mostram inclusos em plagioclásio. As biotitas de cor marrom avermelhada, incluem apatita, zircão e são tão abundante quanto o plagioclásio, resultando daí em uma rocha mesocrática. Zircões euedrais e subedrais e apatita com respectivamente razão comprimento/largura de 3:1 a 2:1 e 8:1 a 3:1, são muito comuns. Allanita não é abundante e aparece inclusa em biotita. Variações para quartzo – andesito são observadas, ou seja, quando estas rochas ocorrem em diques de pequena possança, ele se exhibe com granulação fina o suficiente para se tornar afanítica, o que nos permite caracterizar estas rochas com *quartzo-andesitos*.

Os *dacitos* são universalmente porfiríticos, com fenocristais de plagioclásio e ortoclásio inseridos em uma matriz afanítica de cor cinza escuro. Estas rochas gradam lateralmente para *riodacitos*, mudando unicamente o percentual de K-feldspatos com relação aos plagioclásios. Nos riodacitos, o quartzo associa-se aos feldspatos formando a assembléia de fenocristais. Os fenocristais de plagioclásio são fortemente nublados por partículas de argilo-minerais, calcita e mica branca decorrentes da sua alteração. Os fenocristais de feldspato potássico são de natureza ortoclásica, perítica, com estruturas do tipo “patch” dominante. Mantos albiticos sobre estes feldspatos são relativamente comuns. Em outros casos o feldspato está manteado por plagioclásio e quartzo e então por albita de novo Na matriz destas rochas encontramos plagioclásio exibindo geminação complexa. Clorita representa a pseudomorfose de anfibólitos e biotita que se apresentam como minerais relictos. Zircão euedral e algumas vezes apatita oca, com razões comprimento/largura, respectivamente 3/1 a 2/1 e 8/1 a 5/1, foram observados no interior de relictos de biotita e em plagioclásio. Cavidades miarolíticas são preenchidas por K-feldspato e

quartzo. A matriz é essencialmente granular alotriomórfica constituída por plagioclásio, quartzo e ortoclásio.

Enclaves, sejam microgranulares sejam xenólitos, são encontrados dispersamente distribuídos. Os enclaves microgranulares são de tamanhos variados indo de 3cm a 20cm. Eles são arredondados, de cor preta, afaníticos e ocasionalmente contém xenocristais de feldspatos, cujos tamanhos são sempre inferiores aos encontrados no dacito/riodacito. Em nenhum dos casos foi encontrado alinhamento destes megacristais, ou uma foliação interna primária. Sua composição varia de basáltica a diorítica, com esta última predominando. Olivina não foi encontrada nestes basaltos.

Os xenólitos são abundantes e de composição arenítica, provenientes da Formação Coreáú. Ocasionalmente são encontrados fragmentos de calcário da Formação Frecheirinha. Suas dimensões variam de poucos centímetros a cerca de 30cm; são normalmente angulosos, entretanto, alguns são arredondados exibindo coroas de reação, indicando que houve reação e/ou assimilação parcial do xenólito.

Enclaves duplos foram encontrados logo abaixo da linha de alta tensão que sobrepassa o dique da Santa (denominação dada ao dique adjacente a caieira comunitária). Estes são enclaves microgranulares de textura afanítica que contém fragmentos de quartzito, provavelmente arenitos Coreáú pirometamorfosados. Especulações quanto a gênese destes enclaves são várias, entretanto, o envolvimento apenas parcial de fragmentos de quartzitos pelos enclaves microgranulares, sugere que estes quartzitos já estavam incorporados no dacito, quando foram englobados pelo magma basáltico.

Riolitos e micro-granitos são rochas universalmente porfiríticas com fenocristais de ortoclásio e quartzo, mergulhados em uma matriz de cor vermelha e vermelho-amarelada, e textura variando de afanítica a fanerítica, conforme a dimensão do corpo ou da porção do dique que está sendo observada. As composições modais são similares, independente se as rochas são faneríticas (microgranitos), ou afaníticas (riolíticas). Apesar de serem os mais abundantes, só ocasionalmente exibem enclaves microgranulares. Os fenocristais de ortoclásio são vermelhos, com tamanhos variando de 0,2cm a 0,6cm e ocupam de 5 a 15% do volume total da amostra. Ao microscópio se mostram fortemente alterados para minerais argila e mica branca, são de subedrais a anedrais, por vezes corroídos. Mantos albiticos não são incomuns. Os fenocristais de quartzo são de maneira geral anedrais, exibindo formas de corrosão, entretanto, cristais bipiramidais milimétricos podem ser vistos a olho nu, principalmente em superfícies alteradas, nas quais estes cristais sobressaem. Ainda compondo a associação de fenocristais são encontrados relictos de anfibólios fortemente alterados para clorita verde. Estas porções reliquiares exibem pleocroísmo azul a azul-esverdeado, sugerindo uma composição riebeckítica, porém não temos confirmação química.

A matriz exhibe um padrão granofírico onde as estruturas em ampolheta e em pente são freqüentes. Esta textura está caracterizada por intercrescimento de plagioclásio/K-feldspato e quartzo em quantidades aproximadamente iguais, com o plagioclásio normalmente compondo o núcleo a partir do qual se irradiam os intercrescimentos.

“Clots” biotíticos são freqüentes, muito embora os cristais de biotita estejam quase sempre alterados para clorita.

Aspectos Geoquímicos – Rocha Total

Oito amostras foram selecionadas para a determinação de elementos maiores nos laboratórios da Geosol S.A, em Belo Horizonte e isótopos de oxigênio, gentilmente realizadas pelo Prof. Dr.

A. N. Sial, no Departamento de Geologia da Universidade da Georgia, em Athens, EUA. Variação textural e mineralógica, representatividade dos litotipos em questão e o grau de alterabilidade, foram os critérios utilizados para a seleção das amostras. Os resultados são mostrados na tabela 1.

A Província Subvulcânica Aroeiras está composta por rochas intermediárias a ácidas, com dominância destas últimas, exibindo valores de SiO_2 variando de 57% a 74%. Em todas as amostras as razões $\text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ são maiores que 1, o que implica em um baixo estado de oxidação.

Exceto por uma amostra, todas as demais mostram valores muito baixos de MgO , TiO_2 e MnO , e valores relativamente altos de K_2O e Na_2O . Três amostras são coríndon normativo (fig. 2), com uma delas (D7) apresentando um valor relativamente alto de coríndon, entretanto, a peraluminosidade apresentada pela amostra pode se dever a uma lixiviação de álcalis, como mostrado pela grande concentração de mica sobre os feldspatos. Nenhuma das amostras exhibe Acmita ou qualquer metasilicato em sua norma CIPW. Em conformidade, o índice agpaítico das amostras analisadas é inferior a 1,00 o que está parcialmente contrário à observação de relictos de anfibólios azuis esverdeados similares a riebeckita, um mineral comum em rochas geradas em ambientes tectônicos similares ao da região noroeste do Ceará. Assim, nos parece que a lixiviação de álcalis durante a alteração hidrotermal que afetou todos os litotipos da suíte, foi mesmo o processo responsável pela concentração de alumínio nestas rochas, provocando a peraluminosidade e por conseguinte a ausência de acmita normativa.

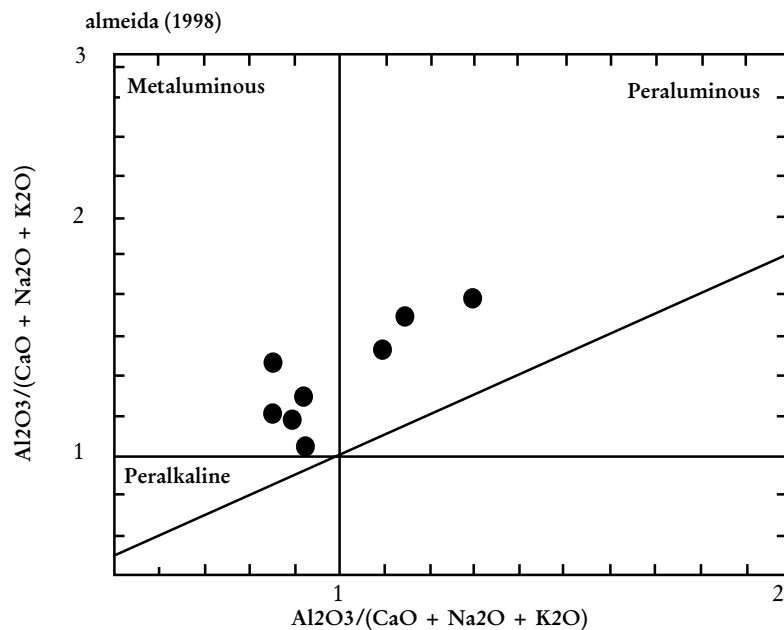


Figura 2 – Diagrama de Maniar & Piccoli (1989), caracterizando a natureza metaluminosa/ Peraluminosa da suíte Aroeira, que exhibe também uma tendência peralcalina .

Os “gaps” em SiO_2 sugerem, quimicamente, a presença de duas séries magmáticas, uma básica/intermediária, aqui representada apenas pelos termos intermediários, e outra ácida. Por outro lado, apesar de termos observados em campo uma gradação natural entre os litotipos dacito-riodacito e riolito, um “gap” é observado na seqüência ácida, o que pode ser devido apenas a uma amostragem deficiente.

A figura 1, construída com base em dados modais, tem nos mostrado a existência deste gap composicional, mas ela está em ligeira discórdia com a figura 3, que nos diz que, quimicamente, a Província Aroeiras está constituída por *Traquiandesitos, Dacitos e Riolitos*, estando ausente os quartzo-andesitos e basaltos. Nós podemos ver que a classificação ditada pela figura 3 tem como base os teores de K_2O e Na_2O , não levando em conta a alocação de K_2O , se em feldspato potássico, ou biotita. A classificação dada pela figura 1 leva em conta as quantidades relativas de feldspato potássico, não levando em conta o percentual modal de biotita. Desta forma, acreditamos que as duas classificações, *traqui-andesito* (química) e *quartzo-andesito* (modal), estão corretas, entretanto, a ausência ou a pequena quantidade de KF modal, nos leva ao uso do termo quartzo-andesito.

Tabela 1 – Composição química e Normas CIPW de amostras representativas da Província Subvulcânica Aroeiras.

Amostra	D23	D16	D3	D7	D13	D1	D5	D9
SiO ₂	57,61	62.32	64.13	65.00	66.80	67.20	71.52	73.89
TiO ₂	1.43	0.83	0.67	Nd	0.62	0.50	0.53	0.20
Al ₂ O ₃	14.29	14.98	16.69	17.40	13.84	15.30	13.05	12.60
Fe ₂ O ₃	2.37	1.41	1.50	2.00	1.58	0.80	0.40	0.86
FeO	5.53	5.46	3.02	3.00	4.31	2.60	1.86	1.29
MnO	0.18	0.14	0.07	0.10	0.08	0.04	0.05	0.04
MgO	4.35	0.77	0.58	0.36	0.45	0.64	0.12	0.14
CaO	4.06	2.94	2.80	2.10	2.10	2.00	2.38	0.84
Na ₂ O	3.46	4.08	3.10	2.33	3.33	3.00	2.83	3.60
K ₂ O	3.31	5.09	4.52	5.36	5.66	5.30	4.85	5.78
P ₂ O ₅	<0.05	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd	Nd
Q (S)	8.58	9.9	21.05	24.65	19.19	23.32	31.77	29.09
or(KAS6)	20.26	30.71	27.54	32.46	33.9	32.19	29.4	34.45
ab(NAS6)	30.26	35.18	26.99	20.16	28.49	26.04	24.34	30.66
an(CAS2)	14.12	7.63	14.32	10.67	6.13	10.2	8.84	1.11
C(A)	0	0	1.63	4.02	0	1.00	0	0
ac(NFS4)	0	0	0	0	0	0	0	0
Diwo(CS)	2.68	3.03	0	0	1.85	0	1.36	1.29
Dien(MS)	1.62	0.65	0	0	0.33	0	0.17	0.28
Di fs(FS)	0.92	2.59	0	0	1.67	0	1.32	1.1
Hy en(MS)	9.63	1.32	1.49	0.92	0.81	1.64	0.13	0.08
Hy fs(FS)	5.46	5.3	3.42	4.12	4.13	3.45	1.03	0.31
Ol fo(M2S)	0	0	0	0	0	0	0	0
Ol fa(F2S)	0	0	0	0	0	0	0	0
mt(FF)	3.56	2.09	2.24	2.97	2.32	1.19	0.59	1.26
il(FT)	2.81	1.61	1.31	0.02	1.19	0.98	1.03	0.38
ap(CP)	0.11	0	0	0	0	0	0	0

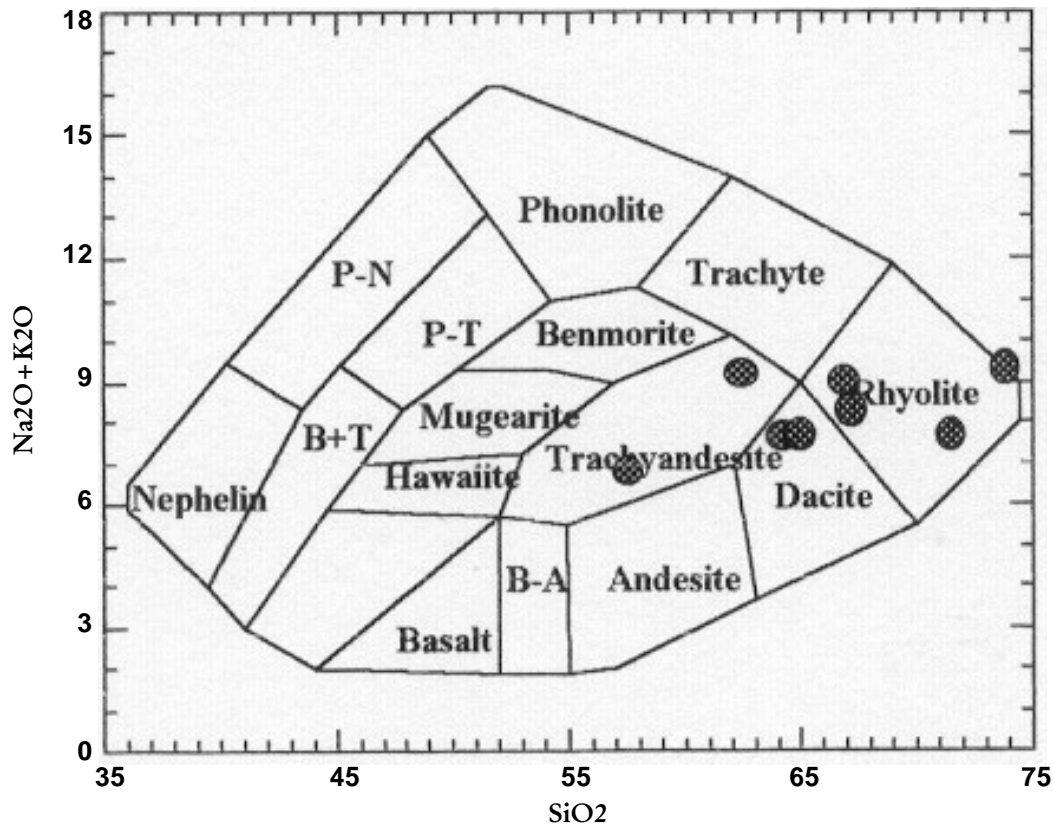


Figura 3 – Diagrama classificatório, SiO_2 versus álcalis, de Cox et al (1981), para rochas vulcânicas, aplicado à Província Subvulcânica Aroeiras.

A variação dos elementos maiores está representada nos diagramas intrerelementais de Harker (Fig. 4), onde são plotados SiO_2 contra os demais óxidos. Nesta figura nós podemos observar um certo alinhamento de pontos, o que pode significar um trend de diferenciação, entretanto, a amostra que poderia figurar como o magma parental, está relativamente distante, separado por um gap relativamente importante. Por outro lado, podemos ver que as rochas que compõem a porção ácida da província coadunam-se relativamente bem, de modo que, como mostrado pela variação de Na, Ca e K com relação a Al, nós podemos pensar em um fracionamento de plagioclásio, produzindo magmas residuais mais potássicos.

Isótopos de Oxigênio

As determinações de isótopos de oxigênio foram gentilmente realizadas pelo Prof. Dr. A. N. Sial, na Universidade da Georgia, em Athens, nos EUA. Todas as extrações foram realizadas por reação com flúor e as análises feitas com um espectrômetro de massa VG Micromass 620C, duplo coletor. Comparações de amostras foram feitas usando o padrão quartzo-róseo, este definido como +8,45‰ relativo a SMOW. Os resultados destas análises são mostrados na tabela 2.

Tabela 2 – Isótopos de oxigênio em rocha total em rochas da Província Subvulcânica Aroeiras.

Amostras	Tipo de Rocha	$\delta^{18}\text{O}\text{‰}$ (SMOW)
D-1	Riodacito	+11,10
D-3	Qz-latito	+10,71
D-5	Riolito	+10,58
D-7	Riodacito	+10,38
D-9	Riodacito	+10,28
D-13	Riodacito	+10,17
D-16	Qz-Diorito	+8,54
D-23	Qz-Diorito	+9,50

Os valores de $\delta^{18}\text{O}$ exibidos pelas rochas Aroeiras variam entre +8,54‰ e +11,10‰, estando seis dos oito valores em questão, acima de 10‰. Observa-se além disso que os valores de $\delta^{18}\text{O}$, crescem gradualmente de norte para sul.

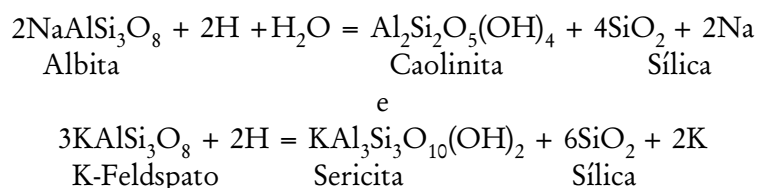
Tem sido assumido, freqüentemente, que rochas graníticas enriquecidas em $\delta^{18}\text{O}$ derivam de protólitos metassedimentares (granitos tipo S), enquanto que os granitos mais pobres em $\delta^{18}\text{O}$, derivam de protólitos ígneos (granitos tipo I), (O'Neill et al 1977; O'Neill e Chappel 1977; Taylor & Silver 1978 e Taylor e Turi 1976). Estudos realizados na Austrália por O'Neill et al (1977) determinaram que o limite entre estes os dois tipos graníticos S e I, é +10‰.

Cerca de 75% das amostras analisadas mostram valores de $\delta^{18}\text{O}$ maiores que +10‰, compatíveis com uma fonte do tipo S, enquanto que duas amostras exibem valores compatíveis com fonte do tipo I.

Já citamos anteriormente que as rochas que compõem a Província Aroeiras estão divididas em duas suítes. Uma suíte plagioclásica dominada por quartzo-andesitos e basaltos e uma suíte potássica onde são encontrados dacitos, riodacitos e riolitos com dominância deste último. As rochas da suíte basáltica-andesítica ocorrem em diques e, mais importante, na forma de enclaves microgranulares inseridos em rochas da suíte dacito-riolítica. Tem sido assumido freqüentemente que estas associações magmáticas são coeval, onde as amostras basalto-andesíticas representam magmas mantélicos enquanto suas hospedeiras representam magmas crustais. Se houve ou não mistura de magmas, isto pode ser confirmado através de estruturas de mistura e quimicamente.

Neste sentido, os dados de isótopos de oxigênio estão francamente compatíveis com uma fonte I para as amostras da suíte basáltica representada pelas amostras D-23 e D-16 e com uma fonte crustal para as demais amostras pertencentes à suíte riolítica. Por outro lado, nós observamos durante as análises microscópicas, sinais de alteração resultantes da interação com água meteórica. Estas estão ressaltadas pelos fenômenos de sericitização, caolinização e cloritização.

Matsuhisa et al (1979) observa que a formação de caolinita e sericita pode ocorrer segundo as reações esquemáticas:



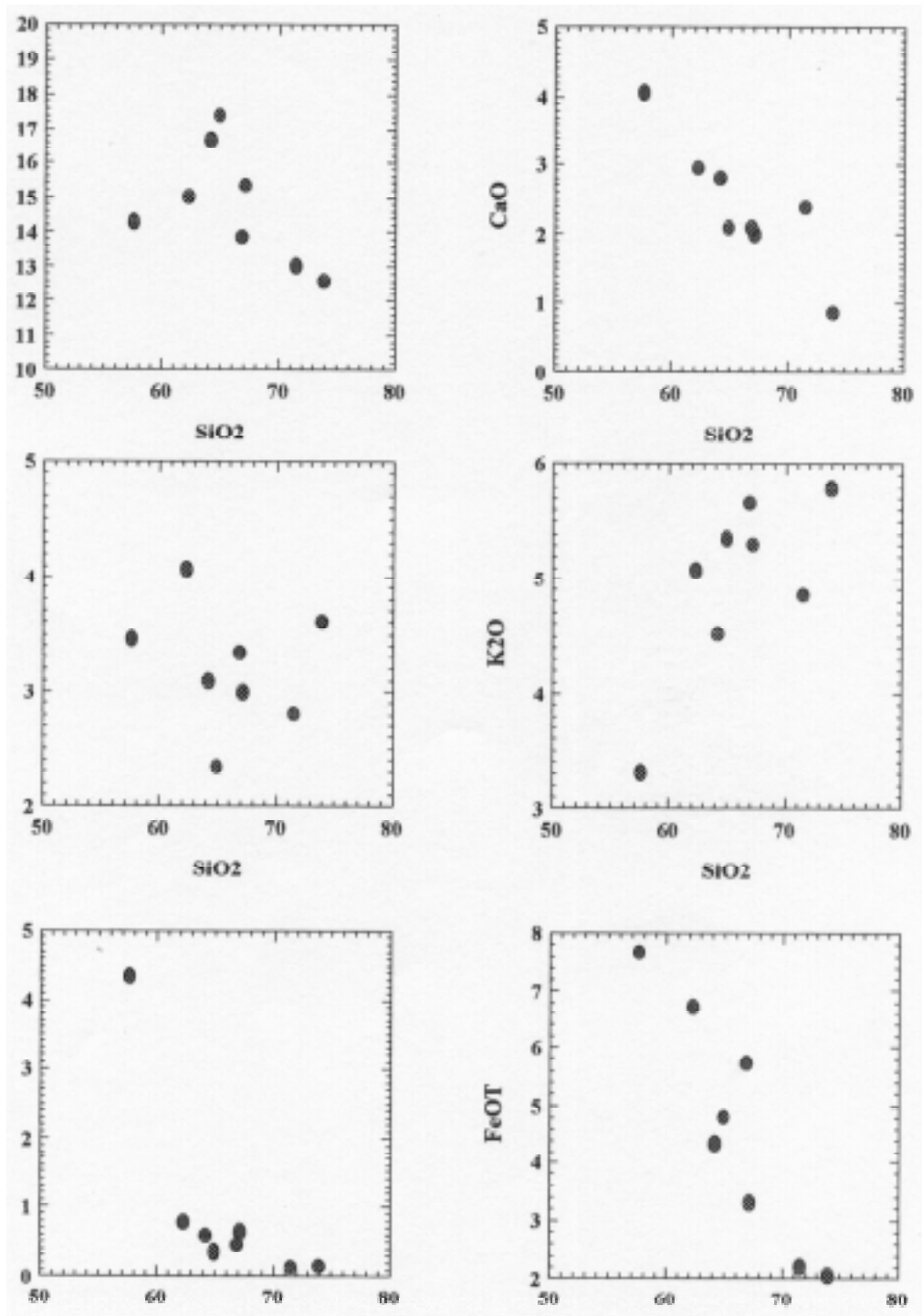


Figura 4 – Diagrama de Harker (1909), aplicado a Província Aroeiras. FeOT = Ferro total.

Nessas reações Na^+ e K^+ são lixiviados em solução. Por isso as abundâncias de metais alcalinos decrescem, com progressiva alteração, com relação ao Al. Isto deve explicar porque as amostras não são acmita normativas, mas coríndon normativas, mesmo exibindo relictos de anfibólios riebeckíticos. Além disso, de acordo com Hemley & Jones (1964, in Matsuhisa et al 1979), com base em estudos no sistema $\text{Na}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$, a caolinita não deve ser estável em temperaturas acima de 350°C e que as temperaturas de equilíbrio da caolinita e sericita decrescem com crescentes razões K^+/H^+ na solução. Nós desconhecemos as razões K^+/H^+ , porém sabe-se da literatura (p.ex. Kogarko, 1974; Bowden, 1974), que HF e HCl são importantes elementos em magmas peralcalinos, assim em temperaturas magmáticas, as razões Na^+/H^+ e K^+/H^+ , devem ser muito baixas para precipitar sericita ou mesmo caolinita. Desta forma, a fonte mais provável para a água hidrotermal que afetou as rochas em análise, deve ter sido uma água meteórica em equilíbrio com as rochas regionais (valores de +12,99‰ a +13,76‰ foram determinados por Sial & Long 1987, nos metassedimentos do Grupo Ubajara), elevando assim o $\delta^{18}\text{O}$ nas rochas vulcânicas.

O Mecanismo de Emplacement

A formação de fraturas de tal grandeza não se processa de forma isolada, pontualmente. Do ponto de vista geotectônico, elas são elementos secundários que ocorrem associadas às feições de maior porte, e refletem a deformação crustal resultante da atuação de esforços regionais. A análise de formação destas fraturas deve ser feita, portanto, em conjunção com outros elementos tectônicos regionais física e temporalmente associados.

Almeida et al (1997) tem mostrado que os corpos graníticos tardi e pós-colisionais se mostram geralmente intrudidos em níveis crustais rasos, cujas profundidades são inferiores a 12 Km. Exemplos são os granitóides Meruoca, Mucambo, Serra da Barriga no Noroeste do Ceará. Nestas porções crustais são comuns os sedimentos e/ou metassedimentos dos facies xistos verdes ou anfibolito (albita-epidoto-anfibolito), cujas temperaturas refletem ambientes de formação dominados por 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), ou 45° (antihorário) 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 os registros naturais do elipsóide de esforços que atuou naquela região, na época de formação daqueles diques.

Para caracterizarmos a época de emplacement do enxame de diques Aroeiras com relação a abertura do proto-rift Jaibaras e seu preenchimento, analisaremos os modelos teóricos de formação de fraturas extensionais associadas a zonas de cisalhamento, uma possível aplicação para outras regiões do Estado do Ceará e por fim a aplicaremos ao Aroeiras.

A Formação e Propagação de Fraturas Extensionais

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. 5A). A forma deste envelope é definida por Secor (1965), como segue:

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

As relações entre os “esforços” cisalhante e normal e o “tensile strength” -K são mostrados na (fig. 5B), extraída de Secor (1965). Nesta figura pode ser visto que o “esforço” cisalhante para $\sigma=0$ é dado por:

$$\tau_0 = 2 K$$

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. 5B). 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.

Na figura 5C, há um “locus” de pontos (τ , σ); (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 $+4K$ com $\sigma_1 = 8K$ 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. 5C).

Estes 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 interseção das fraturas conjugadas é bissectado pela direção de σ_{1eff} (sigma um efetivo, figura 6)

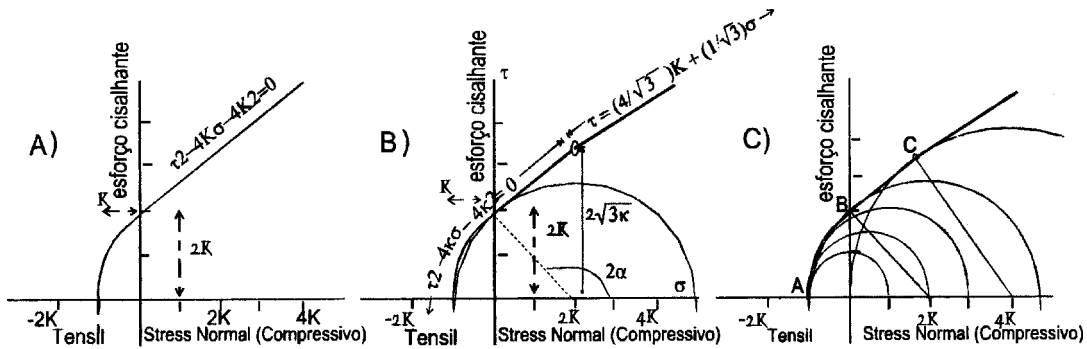


Figura 5 – Diagramas de Mohr composto ilustrando as leis de fraturas de Griffith e Griffith mais Coulomb. Diagrama A mostra a forma parabólica do envelope de Griffith e as relações dos interceptos sobre os eixos s e t. O diagrama B mostra o envelope composto e as equações das porções linear e parabólica. O diagrama C mostra uma família de círculos de Mohr.

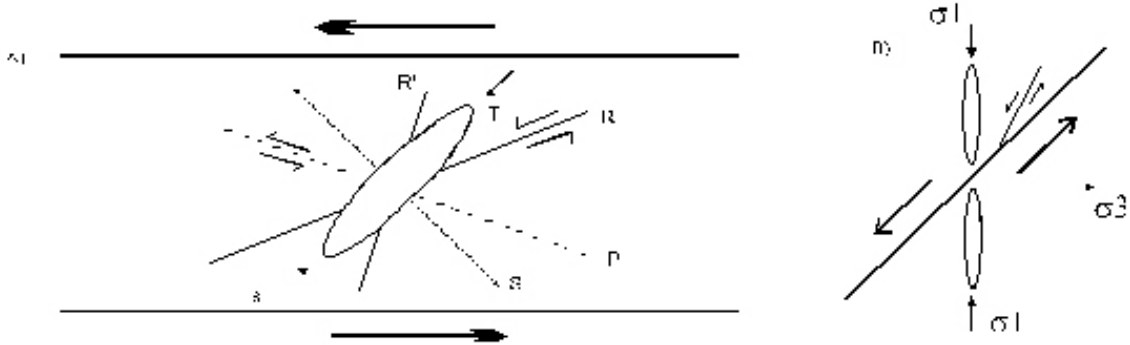


Figura 6 – Geometria de feições secundárias associadas a zonas de cisalhamento dúcteis (A). Par de zonas de cisalhamento sinistrais; As fraturas extensionais T, em ângulos retos com sigma 3, podem estar acompanhadas por fraturas Riedel (R) e Skempton (P). As fraturas antitéticas Riedel (R') também são 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 fraturas Riedel.

Na figura 6 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:

- Formação de pequenas fraturas conjugadas R e R', fraturas estas denominadas de Riedel, que fazem ângulos de aproximadamente $q/2$ com as direções teóricas do cisalhamento (fig. 6B).
- 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.



Figura 7 – Modelo de geração de fraturas extensionais associadas a cisalhamento, aplicado ao emplacement da suíte Aroeiras. Verificar o movimento destal da ZC Sobral-Pedro II.

O acima exposto, ou seja, a combinação geométrica dos elementos estruturais fraturas lineares mais zona de cisalhamento (fig. 7), deixa claro que o emplacement do enxame de diques Aroeiras se fez em função do movimento destal causado por um tensor principal máximo de direção este – oeste, em época imediatamente anterior aos movimentos transtensionais destrais que originaram a abertura da bacia. Os magmas Aroeiras são, portanto, “anteriores” à deposição dos sedimentos e vulcanitos que preenchem o graben Jaibaras.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA, A. R. – 1995 – Petrologia e aspectos tectônicos do Complexo Granítico Quixadá-Quixeramobim-CE. IGUSP, Tese de Doutorado, inédito.
- ALMEIDA, A. R. & ULBRICH, H.G.J. – 1997 – Os magmatismos graníticos cálcio-alcálico e peralcalino e os tensores das deformações brasileiras no Ceará. Atas do XVII Simpósio de Geologia do Nordeste, Fortaleza – CE, 239 – 243.
- BOWDEN, P – 1974 – Oversaturated alkaline rocks: granites, comendites and pantellerites. In SORENSEN, H. (Ed.) – The Alkaline Rocks. John Willey & Sons, N. York. 109-123.
- GRIFFITH, A. A. – 1921 – The phenomena of rupture and flow in solids. Royal Soc. London Phylos. Trans. Acta; 221, 163-198.
- GRIFFITH, A. A. – 1925 – The theory of rupture. Int. Cong. Appl. Mech. 1st. Delft. Proc. 55-63.
- HARKER, A. – 1909 – The Natural History of Igneous Rocks. Methuen, London. p. 131.
- HEMLEY, J. & JONES, W. – 1964 – Chemical aspects of hydrothermal alteration with emphasis on hydrogen metassomatism. Econ. Geol; 59, 538-569
- KEGEL, W.; SCORZA, E. P. & COELHO, F. C. P. – 1958 – Estudos geológicos no Norte do Ceará. DNPM/DGM. Rio de Janeiro. 46 p. (Boletim 184).
- KOGARKO, L.N. – 1974 – Rôle of volatiles. In: SORENSEN, (Ed.) – The Alkaline Rocks. John Willey & Sons, London, 474-487.
- LAMEYRE, J & BOWDEN, P. -1982- Plutonic rock type series: discrimination various granitoids series and related rocks. Jour. Volc. Geother. Res_ 14,169-I 86.

- MANIAR P. D. & PICCOLI P. M. – 1989 – Tectonic discrimination of granitoids. Geological Society of America Bulletin, 101, 635-643.
- MATSUHISA, Y.; HANNA, H.; MITSUBAYA, O. & SAKAI, H. – 1979 – Oxygen isotope study of the Cretaceous granitic rocks in Japan. *Contrib. Mineral. Petrol.* 37, 65-74.
- O'NEIL, J. R. & CHAPPELL, B. – 1977 – Oxygen and hydrogen isotopes relations in the Berridale batholith. *Jour. Geol. Soc. London*; 133, p559.
- O'NEIL, J. R.; SHAW, S. E. & FLOOD, R. H. – 1977 – Oxygen and hydrogen isotopes compositions as indicators of granite genesis in the New England batholith, Australia, *Contrib. Mineral. Petrol.* Vol. 62, pp. 313-328.
- SECOR, D. T. – 1965 – Role of fluid pressure in jointing. *Am. Jour. Sci.* 263, 633-646.
- SHAW, H. R. – 1980 – The fracture mechanisms of magma transport from the mantle to the surface. In: HARGRAVES, R. B. (Ed) – *Physics of Magmatic Processes*. Princeton University Press. 585p.
- SIAL, A. N. & LONG, L.E. 1987. Mineral chemistry and stable isotope geochemistry of the Cambrian Meruoca and Mocambo plutons, Ceará, Northeast Brazil. *Int. Symp. Granites Associated Mineralizations. Salvador, 1987, Extended Abstracts...Salvador*, p. 185-188
- STRECKEISEN, A. – 1976 – To each plutonic rock, its proper name. *Earth Sci. Review.* 12, 1-33.
- TAYLOR, H. P. Jr & SILVER, L. T. – 1978 – Oxygen isotopes relationships in the plutonic rocks of the Peninsular Ranges Batholith., Southern and Baja California. USGS, Open-File, Rep. 78.701, 423-426.
- TAYLOR, H. P. Jr. & TURI, B. – 1976 – High ¹⁸O igneous rocks from the Tuscan magmatic province, Italy. *Contrib. Mineral. Petrol.* 56, 33-54