

FRATURAMENTO NO EMBASAMENTO CRISTALINO DO NORDESTE DO BRASIL: CRONOLOGIA DA DEFORMAÇÃO FRÁGIL, REATIVAÇÃO NEOTECTÔNICA E IMPLICAÇÕES HIDROGEOLÓGICAS

Emanuel Ferraz Jardim de Sá¹

Abstract - Recent methodological developments in the Hydrogeology of crystalline terrains demand detailed studies of rock fracturing, its chronological evolution and relationship to the regional geological framework. The example from Northeast Brazil is discussed to illustrate the discrimination of different fracture sets, including their geometry, kinematics, crustal level and age.

The crystalline brittle structures usually display a complex history, related to different deformation episodes. In the present case, an older, major event corresponds to the late-Brasiliano (Cambrian-Ordovician boundary) deformation, related to the exhumation of a neoproterozoic collisional belt. This setting can be described as a NNE-trending dextral transpressive belt, with brittle and brittle-ductile structures generated at 4-8 km crustal depth. A second, major deformation is associated to the rifting and development of passive margin basins lasting from Jurassic to early Tertiary times. The main structures of this stage were generated under a N to NW extensional regime and at shallower depths (2-4 km) as regards to the late-Brasiliano fracturing. These structures constitute a network of planar discontinuities which are reactivated under near-surface conditions (<1 km depth) by Neotertiary-Pleistocene and Holocene events in the interior (alkaline magmatism and doming) and margins (spreading of the Mid-Atlantic ridge, Andean compression) of the South America plate. The current stress field is characterized on the basis of seismological, morphotectonic and structural data, in terms of E-W compression and N-S extension (a regional effect), which alternated with opposite stress tensors (the more localized, doming effect) during Neogene times.

¹ Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG), Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN); Pesquisador do CNPq; Campus 59.072-970 Natal RN; fone (84)215-3831, fax (84)215-3806, e-mail: emanuel@geologia.ufrn.br. Apoio financeiro PADCT3.

The phenomena of percolation and accumulation of exploitable water are geologically very recent and localized at very shallow crustal levels. As such, the hydric potential of fracture sets in crystalline rocks is determined, among other parameters, by the mode of reactivation (kinematics) of these fractures, subjected to the neotectonic stresses. On the other hand, opening of fractures by decompression and weathering close to the surface emphasize the importance of vertical movements in the recent evolution of the terrain. A chronology of fractures, with their corresponding crustal level, allows a better evaluation of the neotectonic reactivation conditions and is thus an important tool for hydrogeological prospecting in crystalline terrains. Building a regional fracturing model, as discussed in this contribution, is one of the first steps to improve the routine of locating water wells.

Palavras-chave - aquíferos fissurados, modelo de fraturamento, reativação neotectônica

INTRODUÇÃO

A importância do fraturamento para a formação de reservas de água no embasamento cristalino é um conceito bem estabelecido nesse ramo da Hidrogeologia. Neste sentido, a abordagem prospectiva tem utilizado, com grande ênfase, conceitos e métodos de Geologia Estrutural. No presente Congresso, uma contribuição em paralelo discute e reavalia esses conceitos em bases modernas e práticas, com ênfase em dois aspectos: (i) a trama do fraturamento no cristalino tem normalmente uma história complexa, relacionada a diferentes episódios de deformação, que no presente caso se sucedem durante o Fanerozóico. Essas estruturas constituem uma rede de anisotropias planares, com potencial hídrico variável em função de vários parâmetros, entre os quais; (ii) o modo de reativação (cinemática) dessas fraturas, por solicitação dos esforços neotectônicos, condicionando sua “abertura” à percolação e armazenamento de água, fenômenos geologicamente muito recentes e localizados em nível crustal muito raso.

De uma maneira geral, a resposta hídrica é comandada por aspectos como sua conectividade, rugosidade e “abertura”. Os dois primeiros fatores se reportam a feições intrínsecas dos sistemas de fraturas, ou seja, traduzem a geometria, cinemática e nível crustal (na forma de processos de ruptura, brechação, percolação e cimentação por fluidos, crescimento mineral) na sua época de formação. O terceiro é largamente dependente da orientação das fraturas em relação ao campo de tensões atual (=

neotectônico; Carlsson & Olsson 1980/81, Banks *et al.* 1996). Fraturas orientadas em baixo ângulo (subparalelas) ao eixo de compressão principal (ou extensão mínima) σ_1 são aquelas mais “abertas” (funcionam atualmente como juntas de extensão) e, assim, com maior potencial hídrico; em situação oposta, situam-se as fraturas em forte ângulo com σ_1 (corresponderiam a fraturas “fechadas”, com forte componente de compressão), podendo-se visualizar as várias situações “intermediárias” possíveis, equivalentes a fraturas de cisalhamento ou fraturas híbridas.

No tocante à aplicação metodológica, os aspectos acima discutidos (ver Jardim de Sá, este Congresso, para detalhes adicionais) requerem um estudo mais detalhado do fraturamento das rochas, sua evolução cronológica e relação ao contexto regional. É importante discriminar os diferentes sistemas de fraturamento, em termos de sua geometria, cinemática e idade; estabelecer/inferir o campo de tensões local/regional; efetuar correlações e avaliar o potencial hídrico de cada conjunto de fraturas. No embasamento cristalino do Nordeste do Brasil, de idade precambriana (bem como nas demais regiões de escudo), esta tarefa sofre severas restrições, já que as fraturas presentes em um dado afloramento podem, teoricamente, variar em idade desde os tempos atuais (condicionadas à importante atividade sísmica da região) até o final do Precambriano (fraturamento tardio à orogênese Brasileira). A presente contribuição discute aspectos metodológicos e situa a deformação frágil nos terrenos cristalinos do Nordeste setentrional no contexto da sua evolução geodinâmica.

ASPECTOS METODOLÓGICOS

O primeiro item a ser discutido diz respeito ao reconhecimento de conjuntos de fraturas que estejam relacionados a um mesmo regime cinemático e respectivo campo de tensões. Vários livros textos e artigos recentes sumarizam este tipo de conhecimento (Hancock 1985,1994; Ramsay & Huber 1987; Twiss & Moores 1992; Choukroune 1995; Hatcher Jr. 1995; van der Pluijm & Marshak 1997). Isto envolve a distinção de processos de cisalhamento puro, simples ou geral; fraturas de extensão, cisalhamento, estilolíticas e híbridas; regimes de extensão, contração e transcorrência. Em cada um desses regimes, diferentes conjuntos e tipos de fraturas podem funcionar mecanicamente integrados, em “coerência cinemática” (juntas T, R, R', P; falhas de transferência ou rampas laterais; falhas contracionais ou extensionais em zonas de ponte de transcorrências, etc.).

A hierarquização cronológica dos sistemas de fraturas envolve estabelecer relações em termos de: a) interseções e reativação de sistemas, incluindo fraturas com sucessivas estrias e diferentes indicadores cinemáticos; b) marcadores crono-estratigráficos afetados, neste caso envolvendo os litotipos do embasamento precambriano, diques e rochas sedimentares fanerozóicas, coberturas recentes, etc.; c) nível crustal aproximado atualmente expostas na superfície do terreno, inferido a partir do tipo de *fabric* (rochas cataclásticas vs. miloníticas, as primeiras de nível crustal raso e com maior potencial hídrico), *slickenlines* (estrias de abrasão, fibras), crescimentos minerais e preenchimentos por veios.

A reativação neotectônica dos sistemas de fraturas pré-existentes (em especial, dos períodos Cambro-Ordoviciano, Juro-Cretáceo, Terciário) é avaliada em termos da superimposição de diferentes movimentos, onde os mais novos podem corresponder (mas não necessariamente) à atividade neotectônica; estrias de temperatura baixa (argilo-minerais), preenchimentos de fraturas por material crustal raso (argilas, soluções de Fe-Mn, carbonatos, cascalho, etc.); fraturamento afetando coberturas cenozóicas e, em especial, holocênicas; escarpas de falhas, basculamento de superfícies somitais e outros indicadores morfotectônicos de atividade recente.

Finalmente, a reativação neotectônica pode ser avaliada a partir da monitoração da atividade sísmica (muito importante no caso do Nordeste setentrional) e de medidas *in situ* (a exemplo das determinações de *breakout* de poços nos campos petrolíferos). O(s) sistema(s) de tensões assim inferidos podem ser correlacionados aos dados estruturais de campo e da morfotectônica, estabelecendo o padrão de esforços que provavelmente atua(m) na região com poços em locação.

O levantamento desses conjuntos de informações requer o emprego de técnicas de sensoriamento remoto (imagens orbitais e fotografias aéreas convencionais) sequenciadas por estudos de terreno, sendo requerido, do hidrogeólogo, um melhor conhecimento (em especial, atualização) de Geologia Estrutural e da evolução tectônica regional.

O ARCABOUÇO TECTONO-ESTRATIGRÁFICO DA PORÇÃO SETENTRIONAL DO NORDESTE DO BRASIL

Geologicamente, o Nordeste setentrional brasileiro compreende os terrenos cristalinos precambrianos da Província Borborema (Almeida *et al.* 1977,1981), incluindo

metasupracrustais, associações gnáissico-migmatíticas e (meta)granitóides intrusivos, com diferentes idades e distribuídos através de diferentes domínios tectônicos. A orogênese Brasileira, ao final do Neoproterozóico (ca. 600±100 Ma atrás), foi o último evento importante de deformação dúctil, tendo sido precedido, em cada domínio, por eventos mais antigos, principalmente de idade Meso ou Paleoproterozóica. A orogênese Brasileira é relacionada a um processo de colisão de placas, com grande extensão no continente Africano. Ela é bem marcada por importante plutonismo granitóide, metamorfismo de média a alta temperatura e extensas zonas de cisalhamento transcorrentes, com dobramentos lateralmente associados. Ao final desse evento, estruturas frágeis superpostas registram a exumação tectônica do terreno.

O presente trabalho enfoca o cristalino correspondente ao domínio Extremo Nordeste da Província Borborema, designado de Faixa Seridó, nos Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Este domínio é delimitado por importantes zonas de cisalhamento brasileiras, a sul (o lineamento Patos, com *trend* E-W) e a oeste (a zona de cisalhamento de Portalegre, com *trend* NE).

Ao longo da costa Atlântica, ocorrem as bacias Potiguar (a norte) e Pernambuco-Paraíba (a leste), implantadas durante o rifteamento e desenvolvimento da margem continental passiva, a partir do Jurássico superior (Matos 1992). A seção vulcano-sedimentar é principalmente de idade cretácea a terciária, contendo unidades que representam diferentes estágios do processo de rifteamento e deriva continental; correlatos continentais estão preservados no interior da Província (a Formação Serra dos Martins). Um quadro semelhante é observado mais a oeste, no cristalino do Estado do Ceará; neste caso, a bacia costeira compreende apenas a seção *offshore*. A partir do Cretáceo superior, estas bacias evoluíram segundo um regime de margem transformante (Matos 1999).

Durante o Terciário superior, um importante processo de domeamento, provavelmente de origem termal/magmática (relacionado ao vulcanismo básico-alcálico da Formação Macau), originou o Planalto da Borborema, a seguir seccionado por vigoroso processo erosivo, ativo até os dias atuais. A deposição da Formação Barreiras, e outras unidades correlatas (Formação Campos Novos) ou mais jovens (paleocascalheiras e coberturas quaternárias), foi controlada pela subsidência na margem continental e influenciada pelo soerguimento no interior do continente (Jardim de Sá *et al.* 1999).

A DEFORMAÇÃO FRÁGIL NA PORÇÃO SETENTRIONAL DO NORDESTE DO BRASIL

Nesta seção, será esboçada uma cronologia dos principais episódios de fraturamento que atingiram a Faixa Seridó e regiões adjacentes no Nordeste do Brasil, durante o Fanerozóico (ver também Jardim de Sá *et al.* 1999).

A DEFORMAÇÃO TARDI-BRASILIANA: A EXUMAÇÃO DA CADEIA COLISIONAL NEOPROTEROZÓICA.

Este evento mais antigo (Jardim de Sá 1994; Mapa geológico do Rio Grande do Norte, 1998) corresponde a um contexto de transpressão dextral ao longo de zonas de cisalhamento NNE, sucedida por falhas conjugadas NE (dextral) e NW (sinistral) que retratam uma compressão a grosso modo E-W, além de fraturas NNE a N-S (também dextrais ou contracionais). Essas fraturas atualmente aflorantes foram formadas em temperatura ainda relativamente elevada ($<300^{\circ}\text{C}$), possivelmente na faixa entre 4 a 8 km de profundidade, sendo caracterizadas pela parcial ductilidade e feições como: a) *drag folds*, estreitas zonas ou *filmes* miloníticos de baixa temperatura; b) preenchimento por veios ácidos (aplitos, pegmatitos, granitóides, quartzo), em especial nas juntas de extensão e falhas normais E-W, e estruturas *pull-apart*; c) *slickenlines* de baixo *rake*, constituídos por minerais fibrosos (clorita, sericita, muscovita) e quartzo estirado; d) movimento similar ao de zonas miloníticas, no mesmo ou em afloramentos vizinhos; e) texturas cataclásticas, nos exemplos mais tardios/de nível mais raso.

Em termos cronológicos, a deformação frágil tardi-Brasiliana pode ser situada no intervalo Cambro-Ordoviciano (500 ± 30 Ma), com base em datações (K-Ar, Ar/Ar) nos pegmatitos, rochas graníticas e metamórficas.

Durante o restante do Paleozóico, não existem registros da evolução tectônica.

A DEFORMAÇÃO JURO-CRETÁCEA E EO-TERCIÁRIA: O RIFTEAMENTO E IMPLANTAÇÃO DAS BACIAS DE MARGEM PASSIVA.

O segundo grande evento de deformação frágil corresponde a uma série de pulsos de fraturamento, diferenciados cronologicamente e na área de atuação, mas todos filiados ao processo de rifteamento e deriva continental que controlou a abertura do Atlântico Sul. A estruturação mais importante, no interior do continente, corresponde aos sistemas de falhas de Carnaubais (Bacia Potiguar) e de Portalegre (Bacia do Rio do Peixe), que delimitam um grande eixo de rifteamento que atravessa a Província

Borborema - o chamado “*trend* Cariri-Potiguar” (Matos 1992). Neste contexto, falhas de direção NE atuaram com movimento predominantemente normal, segmentadas por falhas de transferência de direção NW a E-W.

No cristalino, os planos de falhas podem mostrar crescimento mineral de baixa temperatura (incluindo fibras de quartzo) porém, mais comumente, são marcados por rochas cataclásticas e pseudotaquilitos. As fraturas verticais E-W, preenchidas pelos diques de diabásio do Vulcanismo Rio Ceará-Mirim (datado ca. 140-120 Ma), são características de uma etapa precoce neste estágio, com eixo de extensão máxima N-S. Todas essas feições foram desenvolvidas sob condições abaixo de 250°C, em um nível crustal comparativamente raso (2 a 4 km da paleosuperfície), em relação às estruturas tardi-Brasilianas.

Por outro lado, na margem leste, a Bacia Pernambuco-Paraíba apresentou uma evolução distinta, embora ainda pouco conhecida. O estilo estrutural, que deve atingir o cristalino que margeia a costa, envolve falhas normais com *trend* N-S e prováveis estruturas de transferência em alto ângulo.

A deformação transformante que passou a caracterizar a margem equatorial, a partir do Cretáceo superior (Matos 1999), ainda não está caracterizada no cristalino. É possível que tenham ocorrido, nessa etapa, eventos de reativação transcorrente dextral ao longo das estruturas E-W. Processos térmicos são apontados como responsáveis por um importante episódio de soerguimento e erosão regionais na porção submersa da Bacia Potiguar, o qual ocorreu após o Mesocampaniano. A passagem do centro de expansão oceânica ao largo da margem continental norte teria soerguido a bacia e formado uma notável discordância regional - a “discordância pré-Ubarana”, causando ainda um intenso processo de reativação tectônica na região (Cremonini & Karner 1995).

Na Formação Serra do Martins, cuja idade é atribuída ao Eoceno, evidências de deformação sin-sedimentar e paleosismicidade (falhas, diques neptunianos, fraturas cônicas em argilitos, estruturas em pilar e boudinage), são mais frequentes onde esses depósitos capeiam ou estão adjacentes às zonas de cisalhamento brasilianas (Jardim de Sá *et al.* 1999). Tais feições indicam a reativação das discontinuidades no embasamento durante este lapso de tempo. O nível crustal das fraturas, nesta etapa final, seria inferior a 1 km.

A DEFORMAÇÃO NEOTERCIÁRIA-PLEISTOCÊNICA: MAGMATISMO INTRAPLACA E O SOERGUIMENTO DO PLANALTO DA BORBOREMA.

A deformação deste evento é melhor caracterizada em coberturas sedimentares, na Bacia Potiguar e no interior do continente. Enquadram-se aqui as estruturas sin-deposicionais e equivalentes tardios, de mesma cinemática, presentes na Formação Barreiras e unidades correlatas do Mioceno-Pleistoceno. Na Bacia Potiguar (em especial, na Formação Jandaíra), este evento deformacional assume grande importância, representado por sistemas de lineamentos que reativam estruturas precambrianas no substrato e/ou cretáceas (caso dos sistemas de falhas de Afonso Bezerra, transcorrente dextral com direção NW, e de Carnaubais, reativado em transcorrência sinistral). Juntas de extensão e falhas extensionais N-S estão inseridas no mesmo contexto cinemático, que implica numa compressão (eixo σ_1) N-S e extensão (eixo σ_3) E-W (Dantas *et al.* 1999).

A sul da Bacia Potiguar, no domínio do Planalto da Borborema, a Formação Serra do Martins foi alçada e hoje está preservada em platôs-testemunhos, cujo arrasamento deve estar associado à deposição da Formação Barreiras no litoral. Em grande parte, os lineamentos e fraturas reconhecidos no capeamento sedimentar dos platôs (os sistemas NE, NW e N-S) podem ser correlacionados ao mesmo evento de compressão N-S e extensão E-W, caracterizado na Bacia Potiguar. Essas fraturas continuam no embasamento cristalino, controladas e reativando estruturas pré-existentes (Barros 1998; Menezes 1999). Algumas ocorrências do vulcanismo Macau (idade Eoceno a Mioceno) também parecem estar controladas por estes lineamentos.

No cristalino, zonas de falhas NW dextrais e NE sinistrais, e a reativação extensional (juntas de extensão e falhas normais) dos lineamentos NNE, hoje expostas na superfície, funcionaram em níveis rasos (< 1 km), exibindo estrias de abrasão, texturas cataclásticas e pseudotaquilitos (Menezes & Jardim de Sá 1999; Nascimento Silva & Jardim de Sá 2000). O tipo de preenchimento mineral característico são os óxidos/hidróxidos de Fe-Mn, carbonatos e a sílica de baixa temperatura (veios de calcedônia), observados seja no cristalino, seja nos carbonatos e arenitos do Cretáceo-Terciário. O preenchimento ferruginoso poderia estar relacionado com o vulcanismo Macau (emanações ?; lixiviação intempérica ?) e/ou o intemperismo laterítico que ocorre no topo dos platôs da Formação Serra do Martins (Menezes & Jardim de Sá 1999).

A “compressão” N-S é tentativamente interpretada como um efeito do domeamento crustal em resposta à subida da pluma associada ao Vulcanismo Macau (Jardim de Sá *et al.* 1999; Dantas *et al.* 1999). Esse contexto envolveria extensão geral em superfície (no

plano horizontal) com σ_1 N-S e σ_3 E-W, alternando e interferindo com o sistema de tensões de escala continental, relacionado à expansão do Oceano Atlântico e deriva continental (σ_1 E-W e σ_3 N-S), que perdura até os dias atuais (Ferreira *et al.* 1998; ver a próxima seção). A transcorrência então superimposta nas fraturas NE e NW, tardi-Brasilianas (estas geradas por compressão E-W), constitui um efeito de inversão e é bem ilustrativa do processo de reativação tardia das fraturas no cristalino.

A DEFORMAÇÃO HOLOCÊNICA: A ATIVIDADE SÍSMICA E A NEOTECTÔNICA.

Os dados sismológicos (Ferreira *et al.* 1998) estabelecem um campo de tensões atual com compressão E-W e extensão N-S, no domínio setentrional da Província Borborema. Por outro lado, também ocorrem situações mais localizadas, a exemplo dos sismos de Palhano (CE), que identificam um movimento transcorrente dextral em planos E-W. A mesma conclusão é obtida da análise de fraturas impressas em *beachrocks* datados do intervalo 7 a 4,5 Ka BP, bem como na Formação Barreiras no litoral leste (fraturas de cisalhamento NE dextrais e NW sinistrais, bissectadas por juntas de extensão E-W)(Caldas *et al.* 1997; Coriolano *et al.* 1999). No litoral norte, fica confirmada a transcorrência dextral associada a um componente extensional, ao longo de falhas E-W paralelas aos cordões de arenitos de praia. Estudos estruturais e morfotectônicos confirmam que o padrão de afloramento da Formação Barreiras, da Formação Tibau, das cascalheiras (Formação Faceira) e das coberturas inconsolidadas holocênicas, é frequentemente controlado pela reativação de estruturas de *trend* NE ou NW, tanto na Bacia Potiguar (Lima *et al.* 1990; Dantas *et al.* 1999) como no litoral leste (Coriolano *et al.* 1999).

Este campo de tensões reativa as estruturas pré-existentes, tal como na *falha sísmica de Samambaia* (Coriolano *et al.* 1997). Neste caso, os sismos atuais correspondem a rupturas em profundidade, não aflorantes. Todavia, estruturas neotectônicas com cinemática compatível foram monitoradas tanto no embasamento cristalino (fraturas preenchidas por cascalheiras e com indicadores cinemáticos de baixa temperatura) como no calcário Jandaíra (fraturas que controlam grutas) e em siliciclásticos (por vezes já limonitizados) da Formação Barreiras. Alinhamentos morfotectônicos correspondentes adentram na plataforma e demarcam a feição denominada de *canyon de Touros*, a NW de Natal (Bezerra 1998).

No interior, as fraturas E-W de idade tardi-brasiliana e/ou cretácea são novamente reativadas em cinemática extensional, marcada por estrias e ressaltos argilosos. É também característico o basculamento da superfície somital de algumas serras (as serras quartzíticas das Queimadas e Umburanas, na região centro-sul da Faixa Seridó, p.ex.), por abatimento ao longo de falhas normais E-W, que recortam boqueirões na paisagem serrana (Nascimento Silva & Jardim de Sá 2000).

Excepcionalmente, a reativação holocênica de fraturas no embasamento foi monitorada através de precipitados carbonáticos datados (método U-Th) no intervalo >300 a 1,5 Ka (Menezes & Jardim de Sá 1999). Essas estruturas permitem diagnosticar a ocorrência de diferentes regimes cinemáticos transcorrentes, com o eixo σ_1 inferido dispendo-se ora N-S/NNE ora ENE/E-W. Tal feição sugere a interferência de dois processos tectônicos distintos, nas margens (expansão da cadeia meso-oceânica, a compressão Andina) e no interior (pluma mantélica, *underplating* magmático e domeamento da crosta) da Placa Sul-Americana; o balanço da magnitude de seus efeitos deve se traduzir na alternância dos campos de tensões acima referidos. O magmatismo intraplaca e a tectônica associada constituem um processo em declínio, substituído pela compressão E-W dos dias atuais.

DISCUSSÃO: IMPLICAÇÕES PARA A HIDROGEOLOGIA DO CRISTALINO

O fraturamento presente no embasamento cristalino é predominantemente de idade antiga, tardi-Brasílica (Cambro-Ordoviciano) ou Juro-Cretácea.

Ao final da orogênese Brasileira, as zonas de cisalhamento transcorrentes funcionaram concomitantemente à exumação e resfriamento da cadeia, superimpondo um conjunto de estruturas dúcteis-frágeis e frágeis, com cinemática similar - transpressão dextral. Essas estruturas tardias compreendem fraturas de cisalhamento e falhas conjugadas NE (dextral) e NW (sinistral) que retratam uma compressão a grosso modo E-W, além de juntas NNE a N-S (também dextrais ou contracionais). Essas fraturas foram desenvolvidas em nível crustal situado entre 4 a 8 km de profundidade.

A deformação Juro-Cretácea obedeceu a um regime extensional, com extensão principal variando de N-S a NW. No cristalino, os planos de falha e juntas verticais E-W, preenchidas pelos diques de diabásio do Vulcanismo Rio Ceará-Mirim, são características desta etapa evolutiva, desenvolvida em nível crustal raso (2-4 km). Este grande evento encerrou com a geração de estruturas relacionadas à cinemática transformante da

margem equatorial (cujo registro no cristalino ainda é pouco conhecido) e a reativação dos cisalhamentos brasileiros, durante a deposição da Formação Serra do Martins, no Terciário inferior.

No intervalo Mioceno-Pleistoceno, um importante conjunto de estruturas transcorrentes desenvolvidas em unidades sedimentares (formações Jandaíra, Serra do Martins e Barreiras) registram uma situação de “compressão” (ou extensão mínima) N-S, cujo contexto tectônico ainda não está plenamente esclarecido. No cristalino, zonas de falhas NW e NE foram reativadas em movimentos dextrais e sinistrais (respectivamente), enquanto os lineamentos e fraturas NNE foram reativados em regime extensional (juntas de extensão e falhas normais), todas funcionando em níveis crustais rasos (< 1 km).

Do ponto de vista hidrogeológico, a deformação frágil tardi-Brasílica e Juro-Cretácea desenvolveu uma trama de fraturas “passiva”, que constitui os canais disponíveis para percolação e sítios de acumulação da água explotável atualmente. Todavia, sua real potencialidade hídrica é determinada por uma combinação entre as feições originais (orientação, geometria, conectividade, rugosidade) das fraturas e seu comportamento atual, ditado pelos esforços neotectônicos e pelos efeitos de decompressão e intemperismo na superfície.

A deformação neoterciária-pleistocênica desempenha um papel positivo adicional para a Hidrogeologia, promovendo extensão tectônica geral no plano horizontal, ao menos em níveis crustais rasos, bem como o soerguimento, intemperismo e erosão (exumação) acelerados dos terrenos cristalinos, na Borborema e outras regiões do Nordeste. Esse processo tectônico interferiu com a compressão E-W propagada a partir da expansão da cadeia Meso-Atlântica e da compressão Andina, e provavelmente vem sendo atenuado até os dias atuais. O acervo estrutural sugere a alternância desses campos de esforços, durante o Neógeno, provavelmente oriundo do balanço de magnitudes entre os dois processos - nas margens e no interior da Placa Sul-Americana. Atualmente, os dados estruturais, morfo e sismotectônicos, creditam um papel mais importante ao sistema de compressão E-W. Deste modo, as fraturas de alto ângulo com direção próxima a E-W são aquelas com maior tendência a abertura (por situarem-se em alto ângulo com o eixo de extensão máxima, σ_3), enquanto as fraturas com direção N-S (em alto ângulo com σ_1) exibiriam menor tendência a abertura; as fraturas NE e NW, de cisalhamento (falhas), exibiriam um comportamento intermediário, todavia com relativo

potencial hídrico ditado pela conectividade mais desenvolvida (Coriolano *et al.* 2000; Nascimento Silva & Jardim de Sá 2000).

Um outro aspecto relacionado às falhas cenozóicas seria a questão do condicionamento, preservação ou erosão de coberturas sedimentares, a exemplo das formações Serra do Martins, Barreiras, Campos Novos e unidades mais jovens (em especial, coberturas aluvionares ou eluvionares holocênicas). Além do seu potencial hídrico específico, essas coberturas funcionam como zonas de recarga (em adição à rede de drenagem) dos aquíferos fissurais.

AGRADECIMENTOS

O autor agradece às discussões e dados obtidos junto a colegas e alunos da Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG) e técnicos da PETROBRÁS (em especial, Renato M.D. Matos, João Marinho M. Neto e Diógenes C. Oliveira), nestes últimos anos. O apoio financeiro a esta pesquisa provém do programa PADCT3 e convênio com a PETROBRÁS (E&P RN-CE).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R. (1977) Províncias estruturais brasileiras. Atas VIII Simp. Geol. Nordeste, Campina Grande: 363-391.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R. (1981) Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Sci. Rev.*, 17: 1-29.
- Banks, D., Odling, N., Skarphagen, H., Rohr-Torp, E. (1996) Permeability and stress in crystalline rocks. *Terra Nova*, 8: 223-235.
- Barros, S.D.S. (1998) Aspectos morfo-tectônicos nos platôs de Portalegre, Martins e Santana / RN. Dissert. Mestrado, Univ. Fed. R. G. Norte, Pós-Grad. Geodin. Geof.,: 133p.
- Bezerra, F.H.R. (1998) Neotectonics in Northeastern Brazil. Tese Dout., Univ. College London: 208p.
- Caldas, L.H., Coriolano, A.C., Dantas, E.P., Jardim de Sá, E.F. (1997) Os *beachrocks* no litoral do Rio Grande do Norte: potencial como marcadores neotectônicos. Atas XVII Simp. Geol. Nordeste, Fortaleza: 369-374.
- Carlsson, A. & Olsson, T. (1980/81) Caractéristiques de fracture et propriétés hydrauliques d'une région au sous-sol cristallin en Suède (i). *Bull. B.R.G.M.* 2, III, (3): 215-233.

- Choukroune, P. (1995) Déformations et déplacements dans la croûte terrestre. Masson: 226p.
- Coriolano, A.C.F., Jardim de Sá, E.F., Cowie, P.A., Amaral, C.A. (1997) Estruturas frágeis no substrato da região de João Câmara (RN): correlação com a Falha Sísmica de Samambaia ? Atas XVII Simp. Geol. Nordeste, Fortaleza: 325-329.
- Coriolano, A.C.F., Lucena, L.F., Jardim de Sá, E.F., Saadi, A. (1999) A deformação quaternária no litoral oriental do Rio Grande do Norte. VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 67-70.
- Coriolano, A.C.F., Jardim de Sá, E.F., Nascimento Silva, C.C. (2000) Structural and neotectonic criteria for location of water wells in semi-arid crystalline terrains: a preliminary approach in the eastern domain of Rio Grande do Norte State, Northeast Brazil. Rev. Bras. Geoc., no prelo.
- Cremonini, O.A. & Karner, G.D. (1995) Soerguimento termal e erosão na Bacia Potiguar submersa, e seu relacionamento com a evolução da margem equatorial brasileira. Atas XVI Simp. Geol. Nordeste, Recife: 181-184.
- Dantas, E.P., Jardim de Sá, E.F., Castro, D.L. (1999) Análise de lineamentos na porção central da Bacia Potiguar, e sua reativação neotectônica. VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 67-70.
- Ferreira, J.M., Oliveira, R.T., Takeya, M.K., Assumpção, M. (1998) Superposition of local and regional stresses in Northeast Brazil: evidence from focal mechanisms around the Potiguar marginal basin. Geophys. Jour. Int., 134: 341-355.
- Hancock, P.L. (1985) Brittle microtectonics: principles and practice. Jour. Structural Geol., 7: 437-457.
- Hancock, P.L., ed. (1994) Continental deformation. Pergamon Press: 421p.
- Hatcher, Jr., R.D. (1995) Structural Geology. Principles, concepts and problems. 2^a ed. Prentice Hall: 525p.
- Jardim de Sá, E.F. (1994) A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na Cadeia Brasileira/Pan-Africana. Tese Doutorado, Inst. Geociências, Univ. Brasília: 804 p.
- Jardim de Sá, E.F., Matos, R.M.D., Morais Neto, J.M., Saadi, A., Pessoa Neto, O.C. (1999) Epirogenia cenozóica na Província Borborema: síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 58-61.

- Lima, C.C., Viviers, M.C., Moura, J.R.S., Santos, A.A.M., Carmo, I.O. (1990) O Grupo Barreiras na Bacia Potiguar: relações entre o padrão de afloramento, estruturas pré-Barreiras e neotectonismo. *Anais XXX Congr. Bras. Geol.*, 2: 607-620.
- Matos, R.M.D. (1992) The Northeast Brazilian Rift System. *Tectonics*, 1 (4): 766-791.
- Matos, R.M.D. (1999) Abertura do Atlântico Sul: riftes na margem equatorial ? VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 64-66.
- Menezes, M.R.F. (1999) Contexto estratigráfico e estrutural da Formação Serra do Martins no Rio Grande do Norte. Dissert. Mestrado, Pós-Grad. Geodinâmica e Geofísica, UFRN: 167p.
- Menezes, M.R.F. & Jardim de Sá, E.F. (1999) Caracterização do fraturamento neotectônico em rochas cristalinas: o exemplo da Grota da Fervedeira, Santana do Matos, RN. VII Simp. Nac. Est. Tect., Lençóis, Bol. Res. Exp.: 62-66.
- Nascimento Silva, C.C. & Jardim de Sá, E.F. (2000) Fracture chronology and neotectonic control in the location of water wells in crystalline terrains: an example from the Equador region, northeasternmost Brazil. *Rev. Bras. Geoc.*, no prelo.
- Ramsay, J.G. & Huber, M.I. (1987) The techniques of modern Structural Geology. Vol. 2: Folds and fractures. Academic Press: 700p.
- Twiss, R.J. & Moores, E.M. (1992) Structural Geology. W.H. Freeman Co.: 532p.
- van der Pluijm, B.A. & Marshak, S. (1997) Earth Structure. An introduction to Structural Geology and Tectonics. WCB/McGraw-Hill: 495p.