



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## DEFORMAÇÃO CENOZÓICA NA REGIÃO DE ICAPUÍ (CE), E SUA IMPLICAÇÃO NA ESTRUTURAÇÃO DE CAMPOS DE PETRÓLEO NA BORDA OCIDENTAL DA BACIA POTIGUAR.

Debora do Carmo Sousa<sup>1,2</sup>, Emanuel Ferraz Jardim de Sá<sup>1,3</sup>,  
Renato Marcos Darros de Matos<sup>1,3</sup>, Alex Francisco Antunes<sup>1,2</sup>, Francisco Fontes Lima Neto<sup>5</sup>,  
Walter Eugênio de Medeiros<sup>1,4</sup>, Pedro Xavier Neto<sup>1,5</sup>

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica (PPGG/UFRN), Campus Universitário,  
Caixa Postal 1596, CEP 59078-970, Natal/RN

<sup>2</sup> Bolsista ANP/PRH-22 - debora@geologia.ufrn.br

<sup>3</sup> Departamento de Geologia e PRH-22 - UFRN

<sup>4</sup> Departamento de Física Teórica e Experimental e PRH-22 - UFRN

<sup>5</sup> PETROBRAS (CENPES e UN RN/CE)

Apoio Financeiro: CT-PETRO/FINEP/PETROBRAS

**Resumo** – Em falésias costeiras no extremo oeste da Bacia Potiguar (Plataforma de Aracati), a Formação Barreiras exhibe estruturas que caracterizam uma deformação de grande magnitude, especialmente entre as localidades de Ponta Grossa e Vila Nova (NW de Aracati). O levantamento em detalhe da geometria das falhas e dobras que afetam a Formação Barreiras conduziu ao reconhecimento de estruturas distensionais (em Ponta Grossa) e contracionais (em Vila Nova), associadas a um sistema de transcorrências. Nesta última localidade, as estruturas contracionais são sucedidas por falhas oblíquas-distensionais. Tais dados permitem caracterizar um campo de tensões neocenozoico, que gerou falhas e dobras e reativou estruturas mais antigas, presentes na seção neocretácea subjacente. A reinterpretação de seções sísmicas e outros dados geofísicos permitem delinear estruturas correlatas (em estilo e, possivelmente, também em idade) em subsuperfície, afetando as rochas silicilásticas da Formação Açu e unidades sobrepostas. O reconhecimento e o detalhamento deste arcabouço estrutural traz implicações importantes para a estruturação (geometria, cinemática, idade) dos campos de petróleo neste setor da Bacia Potiguar, a exemplo do Campo da Fazenda Belém.

Palavras-Chave: Deformação neocenozoica, Formação Barreiras, Bacia Potiguar

**Abstract** – In coastal cliffs in the western Potiguar Basin (Aracati High), the Barreiras Formation displays structures associated with high strain deformation, especially between the localities of Ponta Grossa and Vila Nova (NW of Aracati city). Detailed mapping of the fault and fold geometries led to recognize extensional (at Ponta Grossa) and contractional (at Vila Nova) structures, associated to a strike-slip fault system. In the last place, the contractional structures were succeeded by oblique-extensional faults. These data allow to characterize a neocenozoic stress field, which generated faults and folds and reactivated older structures in the subjacent neocretaceous section. Reinterpretation of seismic sections and other geophysical data were used to map correlated structures, in style and possibly also in age, affecting the Açu Formation siliciclastics and overlying units. Recognition and detailed mapping of this structural framework brings important implications concerning the structure (geometry, kinematics, age) of the oil fields in this portion of the Potiguar Basin, such as the Fazenda Belém one.

Keywords: Neocenozoic Deformation, Barreiras Formation, Potiguar Basin

## 1. Introdução

O controle estrutural envolvido na migração e acumulação de hidrocarbonetos é uma questão importante na exploração e exploração de campos petrolíferos. Em geral, os eventos tectônicos envolvidos na estruturação dos campos são inferidos a partir de métodos indiretos (sísmica) e amostragem restrita (testemunhos). São comparativamente raras as oportunidades de detalhar estruturas controladoras de hidrocarbonetos, em afloramentos que possibilitam uma visão 3D, e um ordenamento cronológico das estruturas. Considerando que, na Bacia Potiguar, a migração e acumulação de hidrocarbonetos constituem processos relativamente jovens (Neógeno), é interessante avaliar o papel de eventos tectônicos cenozóicos, na arquitetura de reservatórios petrolíferos. No caso estudado, a Formação Barreiras, que aflora no litoral cearense, mais precisamente entre Ponta Grossa e Icapuí, apresenta-se como um excelente marcador de eventos deformacionais neocenozóicos, com uma magnitude elevada, seguramente transferida para a seção de interesse econômico, em subsuperfície. A área estudada está inserida na porção oeste da Bacia Potiguar, conhecida como Plataforma de Aracati, entre as localidades de Lagoa do Mato e Icapuí, litoral oriental do Estado do Ceará (figura 1). Nas falésias litorâneas, ocorrem excelentes exposições de rochas sedimentares das formações Jandaíra (restritamente), Barreiras e Potengi, objeto do presente trabalho.

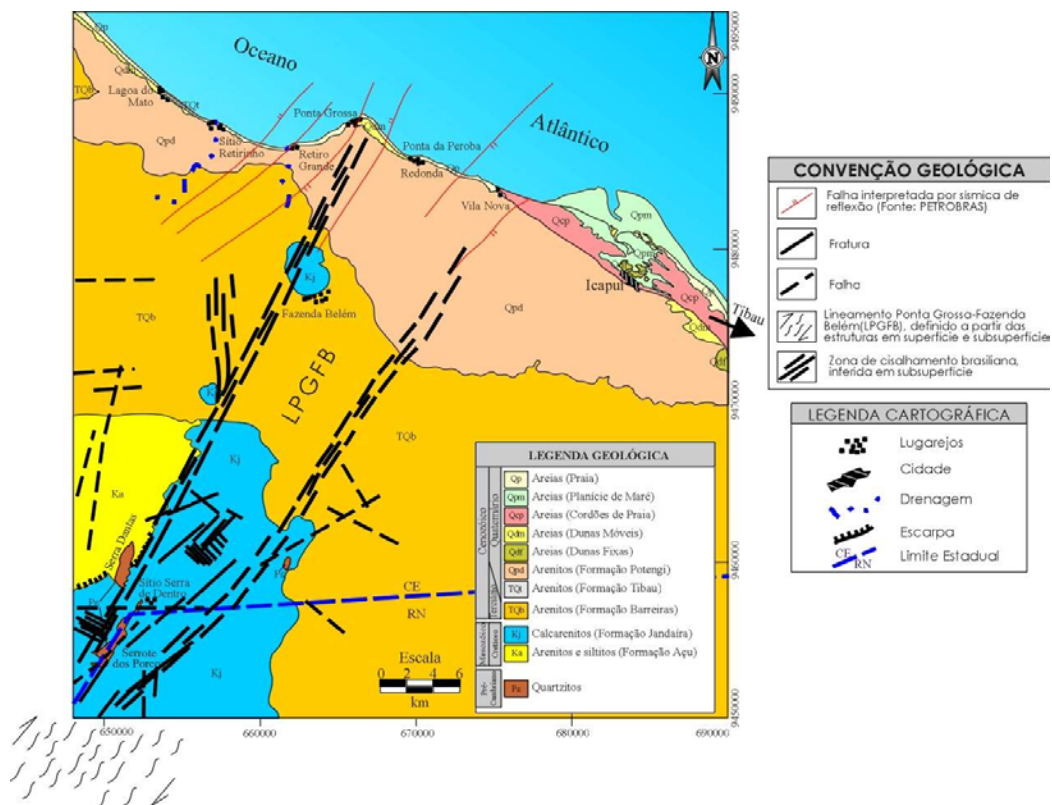


Figura 1 – Mapa geológico, modificado de Fortes (1987), com a localização da região estudada entre as localidades de Lagoa do Mato e Icapuí, incluindo os principais *trends* e o Lineamento Ponta Grossa-Fazenda Belém.

## 2. Contexto Geológico

Ao longo do litoral estudado, foi possível identificar uma unidade carbonática, representada pela Formação Jandaíra, que ocorre de forma restrita na base das falésias; e três unidades siliciclásticas, correspondentes às formações Barreiras, Tibau e Potengi, que predominam lateral e verticalmente, ao longo das falésias (figura 1).

É importante ressaltar a caracterização da Formação Barreiras ao longo do litoral estudado, implicando na idade relativamente jovem (neógena) do expressivo evento tectônico que a afeta (previamente atribuído, por alguns autores, ao Cretáceo, ao correlacionar essas rochas siliciclásticas com a Formação Açú). A Formação Barreiras compreende duas litofácies, dispostas verticalmente em contatos normais, em discordância ou por falhas. A denominada fácies inferior é composta por arenitos siltico-argilosos com estratificação cruzada de baixo ângulo; a fácies superior é caracterizada por arenitos médios a grossos, maciços, com intercalações conglomeráticas. Excetuando o setor fortemente deformado, acima referido, estas fácies ocorrem como camadas horizontalizadas. A Formação Tibau ocorre no extremo NW da área, lateralmente interdigitada com a Formação Barreiras. Capeando as unidades anteriores ocorrem sedimentos correlacionados à Formação Potengi, que aflora ao longo de todo o trecho estudado, em contatos basais por discordância, ora estratigráfica, ora estrutural.

### 3. A Deformação na Formação Barreiras

Na região estudada, devem ser destacados o forte basculamento das camadas da Formação Barreiras, em associação a uma deformação distensional de forte magnitude, que não encontra paralelo em descrições prévias sobre esta unidade, em todo o território brasileiro. A distribuição geográfica dos setores mapeados (nas localidades de Ponta Grossa e Vila Nova) envolve uma coincidência com lineamentos brasileiros e zonas de falhas NE, subjacentes, sendo que estas últimas parecem controlar os campos de petróleo da Fazenda Belém e de Icapuí, na borda ocidental da Bacia Potiguar.

As feições estruturais, identificadas ao longo das falésias, podem ser resumidamente descritas em dois estilos distintos: **(i)** na localidade de Ponta Grossa, ocorre um enxame de falhas distensionais N-S ( $\pm 20^\circ$  Az) com mergulhos de alto a baixo ângulo (Sousa *et al.* 1999, 2001). São em geral falhas planares com arranjo em dominó (figura 2), ou falhas listricas com desenvolvimento de estruturas *roll-over*, envolvendo espessamento de camadas da fácies superior da Formação Barreiras, em direção ao plano da falha, o que atesta uma cronologia em parte sin-sedimentar, para esta deformação. Também ocorrem zonas de descolamento paralelas ao acamamento, desenvolvendo feições de deformação hidropulástica. A rotação dos blocos e falhas nas estruturas em dominó permite estimar valores de distensão entre 30 a 200%. Este padrão deformacional é explicado por uma distensão E-W/WNW, sendo designada como o “evento principal” na região; **(ii)** na localidade de Vila Nova, a fácies inferior da Formação Barreiras é marcada por estruturas de encurtamento, com o desenvolvimento de dobras suaves com eixo mergulhando para SSW e planos incipientes de clivagem de dissolução (figura 3). Neste caso, as feições estruturais sugerem um campo de tensões com encurtamento WNW. Essas dobras são sucedidas por falhas e zonas de cisalhamento oblíquas com *trend* NE, sinistrais-normais, que embutem a fácies superior da Formação Barreiras em estruturas tipo *graben pull-apart*.

As estruturas acima referidas estão particionadas geograficamente entre dois setores do denominado Lineamento Ponta Grossa-Fazenda Belém (o LPGFB, com *trend* NE), caracterizando sítios e regimes em transtração ou transpressão, possivelmente conectados com estruturas transcorrentes E-W ao longo da Margem Equatorial. No contexto de evolução tectônica da Margem Equatorial (Zalán *et al.* 1985, Azevedo 1991, Matos 2000), dextral, lineamentos NE funcionariam com cinemática transcorrente sinistral/contracional (antitética), explicando as dobras na fácies superior da Formação Barreiras (a interseção zonas E-W dextrais, na plataforma, também originaria sítios em contração). A deformação “principal” subsequente, em regime de distensão/transtração, acompanha o término da deposição da Formação Barreiras. Em outros setores, estes eventos são penecontemporâneos (ou imediatamente sucessores) ao Vulcanismo Macau (Jardim de Sá *et al.*, 1999, Jardim de Sá, 2001), para o qual é inferido um contexto de distensão geral no plano horizontal, no topo de uma ampla região dômica, soerguida por uma pluma do manto.



Figura 2 – Falhas planares pós-sedimentares, com arranjo em dominó, na localidade de Ponta Grossa.



Figura 3 – Na localidade de Vila Nova, ocorrem dobras suaves (traços pretos no acamamento) com planos incipientes de clivagem de dissolução (traços verdes).

#### 4. Correlação da Deformação com Dados Geofísicos e o Contexto Regional

O expressivo evento tectônico, caracterizado em superfície, deve ser necessariamente acomodado em subsuperfície, neste caso afetando a seção cretácea (formações Açu e Jandaíra, aqui incluídos os reservatórios de hidrocarbonetos) e o embasamento cristalino pré-cambriano. Para subsidiar um modelo de evolução tectonoestrutural que integre as feições observadas em superfície, com aquelas presentes em maior profundidade, foram analisados os dados geofísicos disponibilizados (mapa magnético, algumas seções sísmicas) e obtidas algumas seções com o método GPR (*Ground Penetrating Radar*).

Os dados obtidos a partir do GPR mostraram a continuidade, em subsuperfície, das estruturas mapeadas ao longo das falésias. Os radargramas obtidos com as antenas de 40 e 200 MHz, constituem os melhores resultados. Com a antena de 40 MHz foi possível atingir uma profundidade de aproximadamente 45 m. A mudança no padrão de refletores permitiu individualizar as formações Jandaíra (na base), Barreiras e Potengi (no topo). Esta frequência foi adequada para imagear as feições estruturais (figura 4), que incluem falhas planares com arranjo em dominó, o basculamento do acamamento e planos de descolamento na porção inferior da Formação Barreiras e em maiores profundidades. Com a antena de 200 Mhz, a profundidade de investigação foi menor (em torno de 10 m), ressaltando as estruturas sedimentares e a discordância na base da Formação Potengi, bem como falhas normais na Formação Barreiras.

Com a reinterpretação das seções sísmicas, foram confirmados vários altos do embasamento cristalino, que se alinham segundo a direção NE-SW. Esses altos são tentativamente interpretados como (pelo menos originalmente) de origem topográfica - cristas miloníticas ou gnáissico-granitóides, associadas a uma zona de cisalhamento transcorrente brasileira, com *trend* NE, como sugerido por exposições do cristalino em janelas no interior da bacia (orladas pelos calcários da Formação Jandaíra e/ou pelos siliciclásticos da Formação Açu). Em alguns trechos das seções sísmicas, os refletores na base da Formação Açu terminam em *onlap* sobre os altos de embasamento cristalino, o que indica que estes constituíam, pelo menos, em parte, feições paleotopográficas quando da deposição daquela formação.

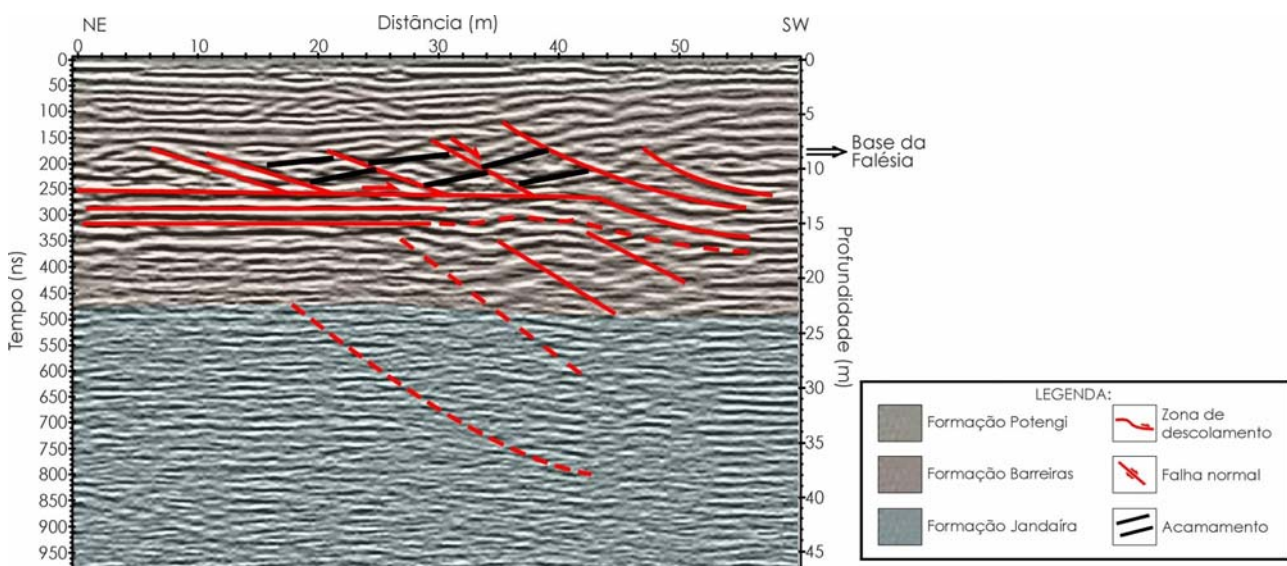


Figura 4 – Perfil interpretado de GPR na localidade de Ponta Grossa com a antena de 40 MHz. Observar o padrão de falhas planares com arranjo em dominó e as superfícies de descolamento na base da Formação Barreiras. Este perfil foi obtido sobre a falésia ilustrada na figura 2.

A feição de maior destaque, nas seções sísmicas, são falhas com componentes inversos de rejeito, que (e ao oposto dos componentes normais em níveis rasos) parecem predominar na base da seção sedimentar (figura 5). O topo do embasamento cristalino/porção inferior da Formação Açu estão seccionados por várias falhas, que em parte coincidem com os altos topográficos (que deste modo teriam sido reativados), ou situam-se nos seus flancos. Especialmente quando seccionam esses altos, as falhas interpretadas são, de um modo geral, de alto ângulo e com aspecto ramificado, no qual falhas de segunda ordem se enraízam ao longo de uma ou duas falhas principais, que em profundidade parecem adquirir mergulho mais suave. Essas feições, associadas à presença de componentes de rejeito em sua maior parte inversos (mas também normais), constituem uma geometria muito semelhante à de estruturas em flor positiva. Nesta geometria, boa parte das falhas mapeadas deve ter um componente importante (principal) de movimento direcional, constituindo falhas oblíquas transcorrentes-inversas. No geral, essas estruturas são compatíveis com um regime de transpressão ao longo de zonas de falhas com *trend* NE, definindo o Lineamento Ponta Grossa-Fazenda Belém. Este estilo contrasta com a cinemática distensional caracterizada na Formação Barreiras em Ponta Grossa, embora possa ser comparado às estruturas contracionais-transcorrentes nas falésias de Vila Nova. Em direção

ao topo das seções, as falhas interpretadas diminuem de tamanho (extensão) e passam a dominar componentes de rejeito normal, com basculamento (rotação) das camadas. A dualidade de rejeitos (inverso vs. normal), em diferentes níveis estratigráficos (base vs. topo das seções, respectivamente), sugere uma inversão na cinemática das falhas e do próprio contexto tectônico (transpressão vs. transtração, respectivamente). Esta situação é compatível com a evolução estrutural nas falésias entre Ponta Grossa e Icapuí. Uma parte dessas falhas pode constituir reativações da zona de cisalhamento brasileira, com a nucleação concentrada nos altos do embasamento.

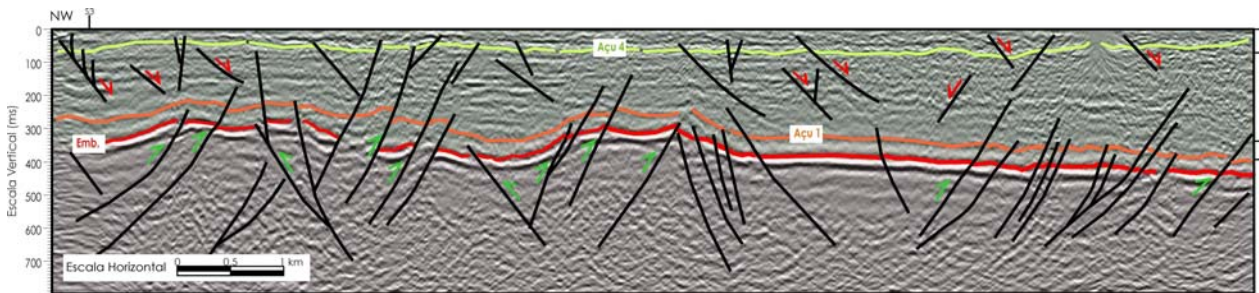


Figura 5 – Reinterpretação de seção sísmica 2D, mostrando o contato entre o embasamento cristalino e a seção cretácea (formações Açu e Jandaíra), bem como os paleo-altos do embasamento afetados por falhas com movimento inverso (setas verdes). Na seção cretácea pode-se observar falhas com movimento normal (setas vermelhas).

No citado contexto da Margem Equatorial e do interior continental adjacente (Azevedo 1991, Matos 2000, Jardim de Sá 2001), o regime transpressivo, inferido a partir das estruturas mapeadas no nível inferior das seções sísmicas de Ponta Grossa, deve ter iniciado no Cretáceo superior, possivelmente no Albiano (no caso de uma idade sin-sedimentar para parte das falhas mapeadas, que se concentram na parte inferior das seções). Infelizmente, o registro sísmico é deficiente ao nível das formações Jandaíra e Barreiras, sendo que algumas das falhas interpretadas em maior profundidade (mas não necessariamente o rejeito inverso) alcançam os calcários. Tal fato introduz uma incerteza na correlação entre essas estruturas “profundas” com aquelas mapeadas ao longo das falésias, como é o caso das estruturas contracionais em Vila Nova. Se estas últimas também se relacionam ao regime transpressivo, como é possível ou mesmo provável, o limite superior de tempo, para este regime, seria o Mioceno. No tocante ao segundo evento observado nas seções sísmicas, associado a um componente normal no rejeito das falhas, sua idade máxima poderia se situar no topo do Cretáceo. Todavia, os dados de campo sugerem que a hipótese mais simples seria correlacioná-lo com a deformação distensional caracterizada na Formação Barreiras – implicando numa idade máxima no intervalo Mioceno-Plioceno.

## 5. Implicações para a Exploração e a Exploração de Petróleo no Setor Ocidental da Bacia Potiguar

Na área estudada, os campos da Fazenda Belém e de Icapuí possuem, como reservatórios, os arenitos e conglomerados da base da Formação Açu (unidade designada informalmente de Açu-1). O óleo acumulado foi gerado a partir da Formação Alagamar, situada na porção *offshore* da bacia (Santos Neto *et al.* 1990, Trindade *et al.* 1992, Souto Filho *et al.* 2000). A entrada dessa unidade na janela de geração de óleo teve início no Oligoceno/Mioceno (a partir de 28 Ma; Trindade *et al.* 1992, Souto Filho *et al.* 2000).

Em reservatórios situados no continente, como no presente caso, a presença de óleo gerado *offshore* implica em migração lateral numa faixa de algumas dezenas de quilômetros (Santos Neto *et al.* 1990, Trindade *et al.* 1992, Souto Filho *et al.* 2000). Deste modo, é necessário disponibilizar condutos (camadas, interfaces, estruturas) e trapas (estruturais, estratigráficas) para possibilitar a migração e subsequente acumulação de óleo neste tipo de reservatório. É muito provável que o LPGFB desempenhe um papel de controle nestes fenômenos, ainda não adequadamente entendido. É reportada uma grande complexidade na distribuição das fácies/zonas da Formação Açu neste setor, em parte creditada à influência dos paleo-altos topográficos, em parte ao próprio modelo deposicional (fluvial entrelaçado) da zona de interesse.

As estruturas descritas em associação com o LPGFB sugerem que o mesmo está enraizado numa zona de cisalhamento brasileira, reativada com um componente de transcorrência sinistral em pelo menos duas etapas, ou dois regimes cinemáticos, desde a deposição das rochas reservatório da Formação Açu. O regime transpressivo sinistral, condicionado pela cinemática transcorrente/transformante ao longo da Margem Equatorial, foi especialmente marcado durante o Cretáceo superior. Todavia, as reativações de falhas transcorrentes E-W (ou nucleação de novas falhas, em marcadores recentes) demonstra que o mesmo continuou ativo até o Holoceno. Interposto a este, pela ação de uma pluma do manto, ocorreu o evento de domeamento e distensão geral na crosta superior, no intervalo Neógeno-Pleistoceno (Jardim de Sá *et al.* 1999); o LPGFB foi então reativado em transtração, tendo associado um amplo

enxame de falhas oblíquas e normais. Um outro fator importante é o provável controle de um centro vulcânico pelo LPGFB, numa possível terminação transtraccional *offshore*, conforme interpretado a partir dos dados magnéticos; esta feição sugere o enraizamento profundo do LPGFB e, conseqüentemente, um ambiente de fluxo de calor elevado, com influência nos processos de geração e migração do óleo. Desta forma, a estruturação do Campo da Fazenda Belém, e possivelmente de outros na Bacia Potiguar, foi significativamente alterada (ou construída) em época relativamente jovem, a partir do Mioceno, em um evento que coincide no tempo com a etapa principal de geração e migração de óleo na bacia.

Atendendo aos requisitos de conservação de área/volume na crosta, durante a deformação, as estruturas mapeadas em superfície necessariamente se propagam em subsuperfície. Nesse contexto, fica fácil perceber que uma parte significativa da complexidade do Campo de Fazenda Belém pode ser de natureza estrutural. O movimento das falhas pode justapor, lateral e/ou verticalmente, blocos contendo diferentes fácies (com porosidades distintas) da Formação Açu, condicionando rotas de migração em menor escala, e gerando e/ou destruindo trapas. Esta possibilidade deve ser considerada ao mesmo nível de prioridade da hipótese de controle do reservatório pela geometria de canais, níveis selantes e outras feições sedimentares. No mesmo sentido, a reinterpretção das seções sísmicas indica que os “paleo-altos” do embasamento tiveram a sua geometria modificada (e em geral, amplificada) pelas estruturas em flor positiva. Esta feição provavelmente configura as trapas do campo como híbridas, em parte paleogeomórficas (Bertani *et al.* 1990), em parte estruturais.

## 6. Agradecimentos

A autora agradece à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela concessão da bolsa de estudo, à PETROBRAS UN RN/CE pela cessão dos dados sísmicos e magnéticos, e à FINEP/CT-PETRO pelo financiamento ao Projeto “Caracterização geomecânica de reservatórios heterogêneos para aumento do fator de recuperação através da perfuração de poços multilaterais”.

## 7. Referências

- AZEVEDO, R. P. Tectonic evolution of brazilian equatorial continental margin basins. University of London, Imperial College, London, Tese de Doutorado, 455p, 1991.
- JARDIM DE SÁ, E. F. Tectônica cenozóica na margem equatorial da Província Borborema, Nordeste do Brasil (A contribuição da Geologia Estrutural no continente). In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 8, Recife : SBG, p. 25-28, 2001.
- JARDIM DE SÁ, E. F., MATOS, R. M. D., MORAIS NETO, J. M., SAADI, A. Epirogenia Cenozóica na Província Borborema: síntese e discussão sobre os modelos de deformação associados. In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 7, Lençóis : SBG, p. 58-61, 1999.
- MATOS, R. M. D. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break-up between Brazil and West Africa. In: Cameron, N. R., Bate, R. H. & Clure, V. S. (eds.) *The Oil and Gas Habitats of the South Atlantic*. Geological Society, London, Special Publications, **153**: 55-73, 1999.
- MATOS, R. M. D. Tectonic Evolution of the Equatorial South Atlantic. In: Mohriak W & Talwani M. (eds.). *Atlantic Rifts and Continental Margins*. Geophysical Monograph, **115**: 331-354, 2000.
- SANTOS NETO, E. V., MELLO M. R., RODRIGUES, R. Caracterização geoquímica dos óleos da Bacia Potiguar: In: Congresso Brasileiro de Geologia, 36, Natal: SBG, **2**: 974-985, 1990.
- SOUSA, D. C., JARDIM DE SÁ, E. F., MATOS, R. M. D., OLIVEIRA, D. C. Deformação sin- e pós- Formação Barreiras na região de Ponta Grossa (Icapuí/CE), litoral ocidental da Bacia Potiguar. In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 7, Lençóis : SBG, p. 90-93, 1999.
- SOUSA, D. C., JARDIM DE SÁ, E. F., MATOS, R. M. D. Caracterização da deformação na Formação Barreiras na região de Ponta Grossa (Icapuí, CE), litoral ocidental da Bacia Potiguar. In: *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 8, Recife : SBG, p. 355-357, 2001.
- SOUTO FILHO, J. D., CORREA, A. C. F., SANTOS NETO, E. V., TRINDADE, L. A. F. Alagamar-Açu petroleum system, onshore Potiguar Basin, Brazil: A numerical approach for secondary migration. In: M.R. Mello and B.J. Katz, (eds.). *Petroleum systems of South Atlantic margins: AAPG Memoir* **73**: 151-158, 2000.
- TRINDADE, L. A. F., BRASSEL, S. C., SANTOS NETO, E. V. Petroleum migration and mixing in the Potiguar Basin, Brazil. *AAPG Bulletin*, **76**: 1903-1924, 1992.
- ZALÁN, P. V., NELSON, E. P., WARME, J. E.; DAVIS, T. L. The Piauí Basin: rifting and wrenching in an Equatorial Atlantic transform basin. In: Biddle & Blick (eds.) *Strike-slip Deformation, Basin Formation and Sedimentation. Soc. Econ. Paleontologist and Mineralogist (SEPM), Spec. Publ.* **37**: 177-192, 1985.