

INTERPRETAÇÃO DE SEÇÕES SÍSMICAS 2D PARA O CAMPO DE XARÉU NA SUB-BACIA DE MUNDAÚ (BACIA DO CEARÁ, NE DO BRASIL)*

Alex Francisco ANTUNES^{1,2}, Emanuel Ferraz JARDIM DE SÁ^{1,3}; Renato Marcos Darros de MATOS^{1,3}; Odilon KELLER FILHO⁴, Francisco Fontes LIMA NETO⁵

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

² Bolsista ANP/PRH-22 - alex@geologia.ufrn.br

³ Departamento de Geologia (DG/CCET/UFRN) - PRH-22

⁴ PETROBRAS S/A - UN-RN/CE, Natal/RN

⁵ PETROBRAS S/A - CENPES, Rio de Janeiro/RN

* Trabalho realizado com o apoio financeiro do CT-PETRO/FINEP/PETROBRAS

Resumo – No Campo Petrolífero de Xaréu, localizado na porção central da Sub-Bacia de Mundaú (Bacia do Ceará, nordeste do Brasil), vem sendo realizada a re-interpretação de seções sísmicas adquiridas nos anos 80 e 90. A re-interpretação tem mostrado que o campo é estruturado a partir de um arranjo principal de falhas lístricas normais, de direção NW-SE, que imprimem uma geometria em anticlinal *roll-over* nas rochas da seção rifte (Formação Mundaú) e transicional (Formação Paracuru) da bacia. Algumas destas falhas também afetam as camadas basais e intermediárias da seção drifte (Formação Ubarana), o que pode denotar a sua reativação (ou mesmo a formação de novas falhas). A nova interpretação tem permitido melhor detalhar a frequência, geometria, orientação, estilo e cinemática das falhas encontradas, fatores importantes na caracterização estrutural do Campo de Xaréu.

Palavras-Chave: reservatório fraturado; falhas lístricas; *roll-over*.

Abstract – This paper presents a reinterpretation of seismic sections of the Xaréu Oil Field, located in the central portion of the Mundaú Sub-basin (Ceará Basin, Northeast Brazil). These seismic sections were acquired during the 80's and 90's. Their re-interpretation show that the field is structured by a main arrangement of NW-trending listric normal faults, with associated roll-over structures affecting the rocks of the rift (Mundaú Formation) and transitional (Paracuru Formation) sections of the basin. Some of these faults also affect the basal and intermediate layers of the drift section (Ubarana Formation), what denotes their reactivation (or even the formation of new faults). The new interpretation allows a better understanding of the frequency, geometry, orientation, style and kinematics of the faults, important factors in the structural characterization of the Xaréu Oil Field.

Keywords: fractured reservoir, listric faults, roll-over.

1. Introdução

O Campo de Xaréu (Sub-Bacia de Mundaú, Bacia do Ceará - Figura 1) possui uma arquitetura controlada por um sistema de falhas normais de idade aptiana, reativadas no Cenozóico. Os dados sísmicos indicam que as principais falhas possuem direção NW-SE, com mergulhos predominantemente para NE. As falhas exibem um padrão listrico, com enraizamento em superfícies de descolamento, e afetam principalmente as seções rifte (Formação Mundaú) e transicional (Formação Paracuru) da Bacia.

No Campo de Xaréu, o Calcário (ou Membro) Trairí, da Formação Paracuru, é o principal reservatório, detendo cerca de 44% de seu volume de petróleo original, em acumulações estruturalmente controladas. Todavia, uma vez que a distribuição da trama de fraturamento natural no reservatório é pouco conhecida, o fator de recuperação de óleo neste sistema é muito baixo (cerca de 5%). Assim, o estudo estrutural detalhado é de suma importância para a determinação da distribuição, orientação e densidade das fraturas e sua influência na permo-porosidade do reservatório, com vistas ao aumento do fator de recuperação de óleo neste campo.



Figura 1: Mosaico de imagens orbitais do satélite LandSat 7ETM+ (bandas 532 em composição colorida RGB), da porção norte do Estado do Ceará, mostrando o arcabouço estrutural simplificado da Bacia do Ceará (e de suas sub-bacias) e a localização do Campo de Xaréu.

2. Caracterização Tectono-Estrutural em Macro-Escala do Campo de Xaréu

A caracterização estrutural do Campo de Xaréu vem sendo realizada através do estudo de diversas técnicas, em diferentes escalas de abordagem. A interpretação de seções sísmicas tem proporcionado o reconhecimento da macro-estruturização do Campo (escalas da ordem de 10^3 a 10^4 m). Estudos de testemunhos de sondagem e a interpretação de perfis de imagem de alguns poços vêm permitindo definir o padrão de fraturamento e falhamento em escala mesoscópica (escalas da ordem de 10^{-1} a 10^{-2} m). A caracterização estrutural final está sendo complementada com os estudos petrotectônicos de seções delgadas de testemunhos em microscópios petrográfico e eletrônico, auxiliando na determinação dos mecanismos de deformação em micro-escala (escalas da ordem de 10^{-3} a 10^{-4} m).

Até então, a caracterização macro-estrutural do Campo havia sido realizada através da interpretação de seções sísmicas impressas em papel. Recentemente, estas mesmas seções sísmicas foram cedidas pela PETROBRAS (E&P UN-RN/CE) em meio digital, o que tem permitido a sua interpretação em microcomputadores do Laboratório de Interpretação Sísmica e Visualização (LISV) do Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte. A interpretação digital vem sendo realizada com o auxílio do programa SeisX, versão 3.6.2, desenvolvido pela Paradigm Geophysical Company.

A análise das seções em microcomputadores tem proporcionado o refino da interpretação realizada em papel, além do reconhecimento de novas feições, não distinguidas em papel devido à escala e a baixa resolução de impressão. Além dos dados sísmicos digitais, também foi cedido pela PETROBRAS (UN/RN-CE) um pacote de dados digitais de poços do Campo (34 poços ao todo), que estão sendo utilizados em complementação aos dados sísmicos para identificação das principais seqüências deposicionais encontradas no Campo de Xaréu.

3. Banco de Dados

Ao todo, estão sendo interpretadas 16 seções migradas em tempo (5 seções *strike* de direção NW-SE e 11 seções *dip* de direção NE-SW). Além disto, 4 seções sísmicas (1 *strike* e 3 *dip*) foram reprocessadas em profundidade para subseqüente balanceamento de seções. A partir da interpretação dos principais horizontes sísmicos foram gerados seus respectivos mapas de topo, em tempo (Figura 2), que posteriormente serão convertidos em profundidade.

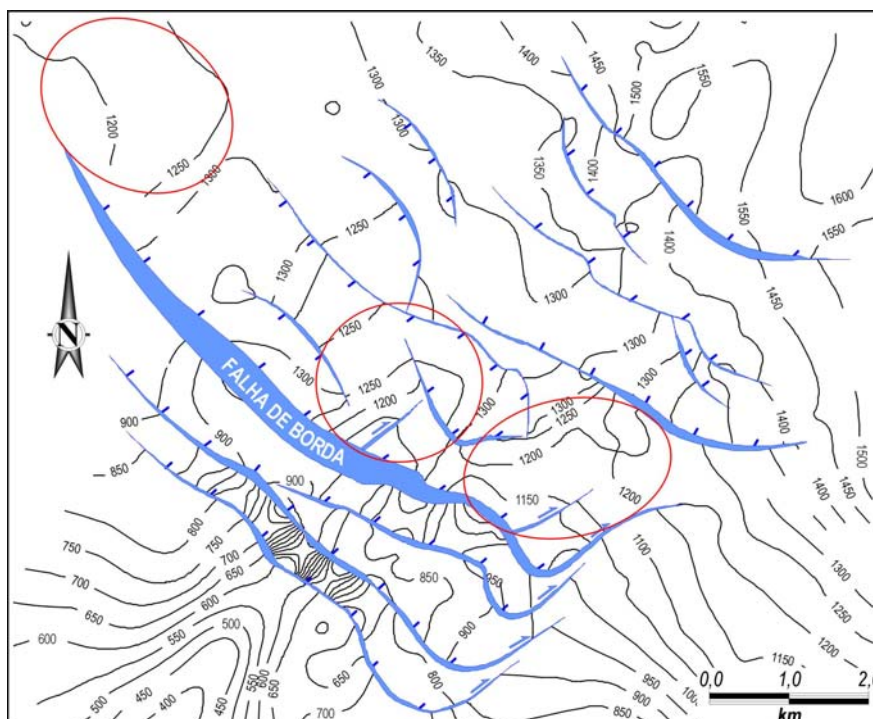


Figura 2: Mapa de contorno estrutural do topo da Formação Paracuru, mostrando a disposição das principais falhas normais no Campo de Xaréu. Notar a presença de falhas de transferência e de rampas laterais com rejeitos direcionais dextrais na porção centro-sul do mapa. As elipses em vermelho indicam os principais altos estruturais do campo. Intervalo de contorno: 50 ms.

4. O Mapa Sísmico e o Arcabouço Estrutural do Campo de Xaréu

O campo ocupa uma área de cerca de 80 km², sendo essencialmente estruturado por um arranjo de falhas normais ou oblíquas (cinemática normal associada a transcorrência dextral) com direção NW-SE e mergulhos dominantes no sentido NE (Figuras 2 e 3).

Na porção sudeste do Campo, estas falhas sofrem fortes inflexões, passando a assumir direção NE-SW, com mergulhos para NW (Figura 2). Estas inflexões podem ser interpretadas como rampas laterais. Em mapa, a maior parte das falhas mostra traço curvilíneo, com geometria em meia-lua (onde a concavidade denota o sentido de mergulho), podendo exibir inflexões para WNW (Figura 2).

Uma falha principal controla o arcabouço geral do campo, funcionando como a *falha de borda* do mesmo e delimita dois compartimentos distintos (Figura 2): o setor localizado no bloco alto, a sudoeste, é caracteristicamente menos afetado por falhas, e horizontes selecionados, como o topo da Formação Paracuru, são relativamente mais rasos neste bloco, apresentando “profundidades” da ordem de 400 a 900 ms. Principalmente na porção mais sudoeste, as isolinhas exibem um comportamento razoavelmente constante, algumas vezes definindo corredores com direção NE (Figura 2), que podem marcar o aporte de sedimentos na bacia; já o bloco baixo da falha de borda se mostra bastante deformado, possuindo um número comparativamente maior de falhas de segunda ordem, o que induz a um padrão mais irregular da orientação e distribuição das isolinhas. Próximo à falha de borda, as “profundidades” do topo da Formação Paracuru são da ordem de 1250 a 1300 ms, crescendo até 1600 ms nas porções mais distais. Três altos estruturais podem ser reconhecidos (elipses em vermelho na Figura 2), originados principalmente pelos dobramentos das camadas.

Falhas de segunda ordem, sintéticas, se enraizam ao longo da falha de borda, compondo um leque lítrico distensional (Figura 3). Segmentos de falhas normais antitéticas, com mergulhos para SW, também ocorrem em alguns setores do Campo, em particular na sua porção oeste (Figuras 2 e 4). Falhas com direções NE-SW e N-S, respectivamente com mergulhos para NW e para W, aparecem associadas às falhas principais, muito provavelmente atuando como falhas de transferência de rejeitos direcionais dextrais, com uma componente normal associada.

As falhas principais exibem mergulhos razoavelmente elevados nos níveis mais rasos do campo, sofrendo uma suavização em suas inclinações com o aumento da profundidade, chegando a estarem sub-horizontalizadas ao longo de uma superfície de descolamento basal (*detachment*), que corresponde à falha de borda (Figura 3). O bloco do piso do descolamento basal não é conhecido diretamente por sondagens, podendo ser composto por unidades sedimentares mais antigas, de idade triássico-jurássica ou paleozóica, ou mesmo pelo substrato cristalino pré-cambriano. Esta geometria lítrica das falhas freqüentemente imprime uma morfologia em anticlinais *roll-over*, para as camadas no teto.

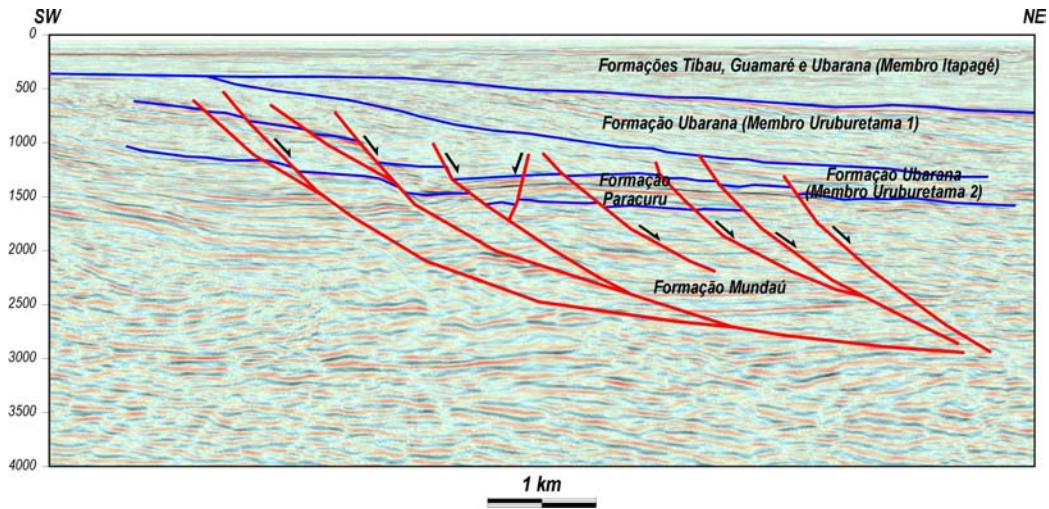


Figura 3: Seção sísmica SW-NE exibindo a estruturação predominante no Campo de Xaréu, caracterizada por um arranjo de falhas normais de direção NW-SE, em padrão lítrico, com mergulhos para NE. Notar a presença de uma falha antitética na porção central da seção. Escala vertical em milissegundos.

Os anticlinais *roll-over* exibem comprimento de onda de cerca de 5-10 km, com geometria suave, ligeiramente assimétrica, e perfil paralelo. Os eixos são sub-horizontais, sinuosos, com direção principal NW-SE.

As falhas afetam principalmente os pacotes sedimentares das formações Mundaú e Paracuru (Figura 3), muito embora, em alguns casos, possam ser reconhecidos segmentos de falhas que afetam os Membros Uruburetama e, menos freqüentemente, Itapagé, da Formação Ubarana (Figura 4). Mesmo internamente, no Membro Uruburetama, algumas falhas são truncadas por discordâncias, indicando que a deformação aconteceu durante várias etapas de deposição desta seqüência sedimentar. Nos pacotes da Formação Mundaú, comumente observa-se espessamento da seção sedimentar de nordeste para sudoeste, em direção à falha de borda, indicando deposição concomitante à atuação das falhas, fato tipicamente observado em uma seqüência rifte. Por seu turno, as camadas pertencentes à Formação Paracuru não exibem variações de espessuras significativas ao longo das seções estudadas.

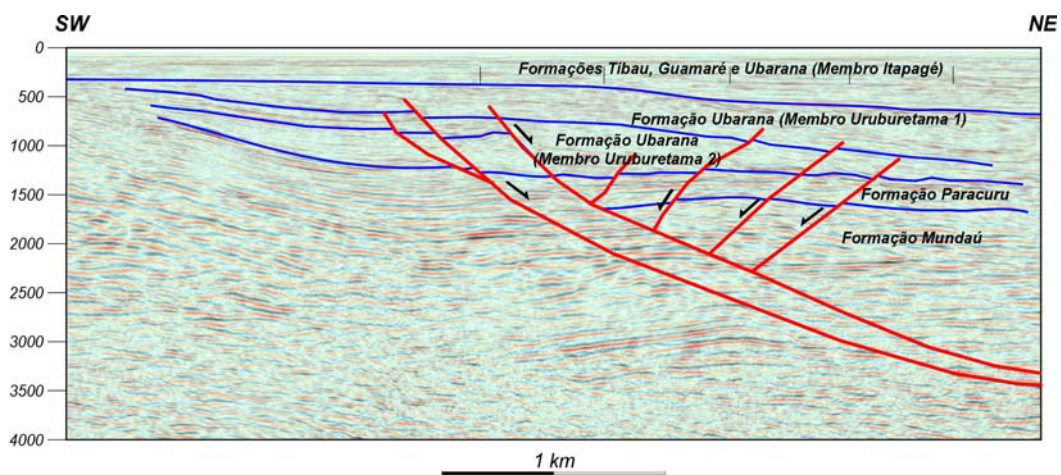


Figura 4: Seção sísmica SW-NE com a disposição das falhas antitéticas de direção NW-SE e mergulhos para SW, principalmente observadas na porção oeste do Campo de Xaréu. Escala vertical em milissegundos.

Tais fatos permitem indicar que o período de atividade principal das falhas ocorreu quando da deposição das rochas da Formação Mundaú, entre o Eo e o Meso-Aptiano, isto é, a época do início do “rifteamento” que originou a Bacia do Ceará, durante o quebramento do Gondwana. Esta etapa foi seguida de um período de maior quiescência tectônica, durante a deposição da Formação Paracuru. Um segundo estágio de deformação importante se instalou logo

após a sedimentação das rochas da Formação Paracuru, que também se apresenta fortemente afetada por falhas. Uma vez que não se observa espessamento de seção na Formação Paracuru, pode-se concluir que as falhas se instalaram após a deposição desta formação, indicando um período de reativação das falhas pré-existentes, ou mesmo a nucleação de novas falhas. Tal período de recorrência deve ter ocorrido após a sedimentação dos pacotes pertencentes ao Membro Uruburetama, pois algumas falhas também afetam esta unidade, enquanto outras são truncadas por ela. Um último pulso deformacional deve haver atuado até o início do Paleógeno, tendo em vista que as camadas mais basais do Membro Itapagé também se mostram afetadas por falhas.

Deste modo, pelo menos três estágios de deformação podem ser reconhecidos na Sub-Bacia de Mundaú, a partir do Eo/Meso-Aptiano: o primeiro estágio ocorreu durante a sedimentação da Formação Mundaú, quando do rompimento do Gondwana; o estágio subsequente deve ter iniciado após a deposição da Formação Paracuru e das camadas basais do Membro Uruburetama da Formação Ubarana; por fim, o último estágio ocorreu logo após a sedimentação das camadas basais do Membro Itapagé, quando a margem passiva equatorial atlântica já estava praticamente instalada.

5. Considerações Finais

A interpretação das seções sísmicas tem proporcionado uma melhor caracterização estrutural em escala macroscópica do Campo de Xaréu.

O arcabouço geral do Campo, com mapeamento de falhas principais de direção NW-SE, é similar às interpretações atualmente existentes na PETROBRAS. Nesta nova interpretação foram melhor delineadas a quantidade e a geometria das falhas delineadas, as variações locais em suas direções e, principalmente, sua cinemática, no quadro de um modelo tectônico em desenvolvimento.

Tais fatos trazem importantes informações quanto ao mecanismo de abertura da Sub-Bacia de Mundaú. As interpretações na PETROBRAS, caracterizam para a Sub-Bacia (e por conseguinte para o Campo de Xaréu) um cenário dominado por rifting ortogonal, com o desenvolvimento de falhas normais. A associação entre os dados de testemunhos e a caracterização macro-estrutural do Campo tem permitido concluir que a abertura da Sub-Bacia de Mundaú ocorreu de forma oblíqua, onde as principais falhas normais também exibem componentes de rejeitos direcionais dextrais.

Esta interpretação se coaduna com aquela levantada por Azevedo (1991) e Matos (2000) para a Margem Equatorial Atlântica, que teria se desenvolvido a partir da instalação de falhas transcorrentes (que evoluíram em seguida para falhas transformantes) dextrais, de direção E-W.

Os resultados atualmente levantados serão complementados pelo balanceamento das seções sísmicas em profundidade, visando dar maior consistência às interpretações estruturais no Campo de Xaréu.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem à Petróleo Brasileiro S/A (PETROBRAS - UN RN/CE) pela gentil permissão ao acesso aos testemunhos de sondagem utilizados neste trabalho, à Agência Nacional do Petróleo (ANP) pela concessão de bolsas de estudo, e à Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) e à PETROBRAS através do projeto “Caracterização Geomecânica de Reservatórios Heterogêneos para Aumento do Fator de Recuperação através da Perfuração de Poços Multi-Laterais” (CT-PETRO/FINEP/PETROBRAS), pelo financiamento das pesquisas.

7. Referências

- AZEVEDO, R. P. *Tectonic evolution of brazilian equatorial margin basins*. Imperial College, London University, London/UK, Ph. D. Thesis, 455p, 1991
- MATOS, R. M. D. Tectonic evolution of the Equatorial South Atlantic. In: *Atlantic rifts and continental margins, Geophysical Monograph 115*, American Geophysical Union, 331-353, 2000.