



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 7, n° 2 (2021)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID25087>



INTERPRETAÇÃO SÍSMICA E MODELAGEM 3D ESTRUTURAL NA BACIA DE BARREIRINHAS (MARANHÃO, BRASIL)

Karoliny Gusso Conte¹; Pedro Andrés Chira
Oliva²

¹Bacharel em Geologia, Departamento de Geologia. Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), Alegre/ES, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3826-4127>

Email: karolinygc@gmail.com

²Doutor em Geofísica, Instituto de Estudos Costeiros (IECOS), Universidade Federal do Pará (UFPA), Bragança, PA, Brasil.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3672-1577>

Email: chira@ufpa.br

Resumo

Descobertas de hidrocarbonetos nas bacias da Margem Equatorial Africana e no Golfo da Guiné impulsionaram o interesse exploratório nas bacias da Margem Equatorial Brasileira, por terem estado juntas antes da Deriva Continental. Este interesse surgiu pois ambas margens equatoriais da América do Sul e a Africana são consideradas análogas. A Bacia de Barreirinhas pertence a Margem Equatorial Brasileira. Esse trabalho apresenta os resultados da interpretação sísmica e da modelagem 3D estrutural, no contexto da tectônica gravitacional, em uma área com cobertura sísmica 3D na Bacia de Barreirinhas. Mapeou-se o domínio compressional de um sistema extensivo-compressivo. Identificaram-se falhas inversas e falhas de empurrão, dobras relacionadas a falhas, como dobra de inflexão de falha (fault bend fold) e dobra de propagação de falha (fault propagation fold), por vezes acompanhadas de feições de retro-empurrão (backthrust). Estruturas conectadas por uma única superfície de deslocamento basal. O modelo 3D estrutural proporcionou uma visualização mais robusta do arcabouço estrutural. As informações podem formar a base do modelo 3D para integração com os modelos estratigráficos e petrofísicos, com representação da distribuição lateral e vertical os quais são importantes para diminuição do risco exploratório, contribuindo para o conhecimento da Margem Equatorial, principalmente da Bacia de Barreirinhas.

Palavras-Chave: Margem Equatorial Brasileira; Tectônica Gravitacional; Sistemas extensivo-compressivo.

SEISMIC INTERPRETATION AND 3D STRUCTURAL
MODELING IN THE BARREIRINHAS BASIN
(MARANHÃO, BRAZIL)

Abstract

Discoveries of hydrocarbons in the basins of the African Equatorial Margin and Guinea Gulf stimulated the exploratory interest in the basins of the Brazilian Equatorial Margin, for being together before the Continental Drift. This interest emerges because both African and South American equatorial margin are considered analogous. The Barreirinhas Basin is a member of the Brazilian Equatorial Margin. This work presents the results of the seismic interpretation and structural 3D modeling, in the gravitational tectonics context, in an area covered by 3D seismic data, in the Barreirinhas Basin. The compressional domain of an extensive-compressive system was mapped were identified reverse faults, thrust faults and fault-related folding like fault-bend and fault-propagation fold that can be accompanied by backthrust features. These structures are connected by a single basal displacement surface covering deep to ultra-deep waters of the basin. The 3D structural modeling provided a more robust visualization of the structural framework. The information can form the basis of the 3D structural model for integration with the 3D stratigraphic and petrophysical models, with the representation of the lateral and vertical distribution that are important for the decreased exploratory risk, contributing to the knowledge of the Equatorial Margin, especially in the Barreirinhas Basin.

Keywords: Brazilian Equatorial margin; Gravitational tectonics; Extensive-Compressive systems.

INTERPRETACIÓN SÍSMICA Y MODELADO
ESTRUCTURAL 3D EN LA CUENCA DE
BARREIRINHAS (MARANHÃO, BRASIL)

Resumen

Los descubrimientos de hidrocarburos en las cuencas del Margen Ecuatorial Africano y el Golfo de Guinea despertaron el interés exploratorio en las cuencas de la Margen Ecuatorial Brasileña, ya que estaban juntas antes de la Deriva Continental. Este interés surgió porque ambos márgenes en América del Sur y África son considerados análogos. La Cuenca de Barreirinhas pertenece al Margen Ecuatorial Brasileño. Este trabajo presenta los resultados

de la interpretación sísmica y el modelado estructural 3D, en el contexto de la tectónica gravitacional, en un área con cobertura sísmica 3D en la cuenca de Barreirinhas. Se cartografió el dominio compresivo de un sistema extensivo-compresivo con la identificaron de fallas inversas, fallas de empuje y pliegues relacionados con fallas como pliegues de fallas y de propagación de fallas que pueden ir acompañados de características de retroceso. Estas estructuras están conectadas por una única superficie de desplazamiento basal que cubre las aguas profundas a ultraprofundas. La información puede formar la base del modelo estructural 3D para su integración con los modelos estratigráficos y petrofísicos, con la representación de la distribución lateral y vertical que son importantes para la disminución del riesgo exploratorio, contribuyendo al conocimiento del Margem Ecuatorial y la Cuenca de Barreirinhas.

Palabras-clave: Margem Ecuatorial Brasileira; Tectónica gravitacional; Sistemas extensivos de compresión.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento do arcabouço estrutural e do contexto tectônico são imprescindíveis para o entendimento da atuação do sistema petrolífero em uma bacia sedimentar e a construção de modelos geométricos 3D permitem uma visualização simultânea e, conseqüentemente, uma interpretação integrada de diferentes elementos geológicos (PAVLOVSKI, 2009).

A Margem Equatorial Brasileira inclui as bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar. Essas bacias são estruturalmente complexas, com poucos estudos publicados e faltam áreas com cobertura de sísmica de reflexão 3D. Nas margens continentais, principalmente em regiões com grande quantidade de aporte sedimentar são identificados fluxos gravitacionais e depósitos associados a eles que são de extrema importância para construção sedimentar destes locais (ARAÚJO et al, 2009, p. 486).

O estudo da tectônica gravitacional (gravity tectonics) tem recebido especial atenção da comunidade científica nas últimas décadas, pois importantes áreas potenciais e/ou produtoras de petróleo são estruturalmente afetadas por deformações induzidas por um nível basal móvel, tendo como exemplo o Golfo do México, bacias da margem Leste Brasileira, Margem Oeste Africana, bacias do Mediterrâneo (PEROVANO et al, 2009, p. 490).

Exemplos notáveis de estruturas relacionadas à tectônica gravitacional e aos cinturões gravitacionais de dobras e cavalgamento nas Bacias da Margem Equatorial (Brasileira e Africana) foram apresentados por Zalán (1998; 2001, 2011), Oliveira et al. (2012); Da Cruz et al. (2009), Krueger et al., (2012), Perovano et al., (2009), Pellegrini (2018); Corredor et al., (2005); Yang et al. (2020). No entanto, apesar de conhecidas, ainda há muitos estudos que podem ser realizados para contribuir com uma interpretação mais íntegra de diferentes elementos geológicos.

O presente trabalho tem como objetivo identificar e descrever as estruturas subsuperficiais associadas a movimentos de massa que resultaram na formação dos cinturões gravitacionais de

dobras e cavalgamento, que constituem o domínio compressivo de um sistema extensivo-compresivo na Bacia de Barreirinhas. A modelagem 3D estrutural proporciona um aumento no conhecimento do arcabouço estrutural na região dos cinturões gravitacionais de dobras e cavalgamento que estão presentes desde a quebra do talude continental até o sopé continental em águas profundas a ultraprofundas da Bacia de Barreirinhas.

1.1. Área de Estudo

A bacia sedimentar de Barreirinhas cobre parte do litoral e da plataforma continental do estado do Maranhão, ocupando uma área de aproximadamente 46.000 km², dos quais 8.500 km² são emersos (FEIJÓ, 1994, p. 103; TROSDTORF *et al.*, 2007, p. 331, Figura 1). Faz parte da Margem Equatorial brasileira, que junto com as bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Ceará e Potiguar se formaram em um contexto geológico de tectônica transformante resultante da abertura do Oceano Atlântico no Cretáceo (PELLEGRINI, 2018, p. 486).

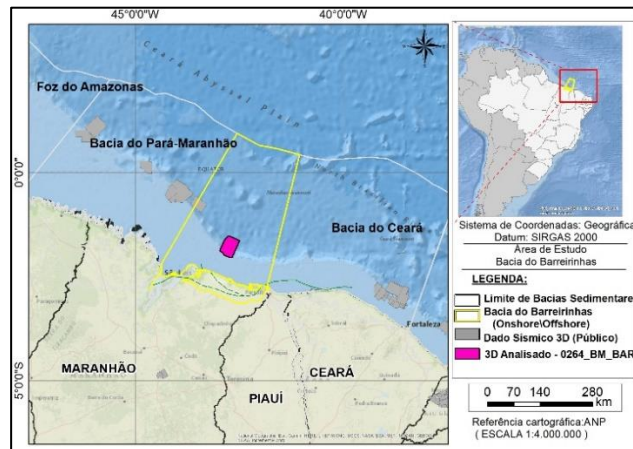


Figura 1 - Mapa de localização da bacia sedimentar de Barreirinhas.

1.2. Contexto Geológico

Estilos estruturais característicos de rifteamento transensivo ao longo desse limite de placas conduziram a uma evolução segmentada da Margem Equatorial, com sub-bacias que apresentam histórias contrastantes em termos de fluxo térmico, subsidência, distribuição de fácies sedimentares, magmatismo, eventos de soerguimento e episódios de deformação (MILANI, 2000, p. 362).

Nestas áreas é possível identificar estruturas com componentes compressivos, transcorrentes (SZATMARI et al., 1987, p. 180) e ainda, principalmente em regiões de significativo aporte sedimentar, pode ocorrer estruturas relacionadas à tectônica gravitacional induzida pela movimentação das seqüências sedimentares sobre um ou mais níveis de descolamento (PEROVANO et al., 2009, p. 1; DA CRUZ et al., 2009, p. 1), alvo do presente trabalho (Figura 2).

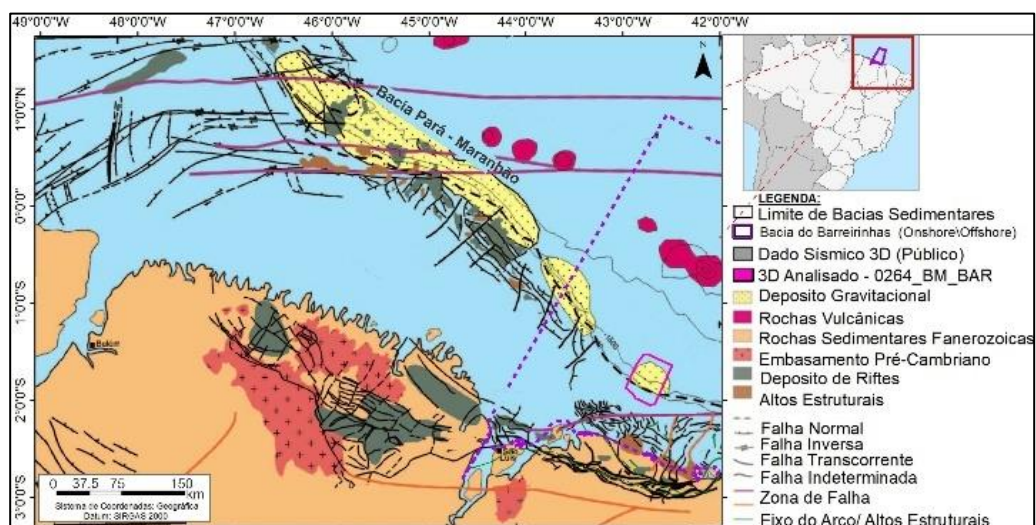


Figura 2 - Arcabouço estrutural da margem equatorial do Brasil com representação dos sistemas gravitacionais presentes nas bacias do Pará-Maranhão e de Barreirinhas e localização da área do levantamento 3D utilizado no estudo. Fonte: Modificado de Oliveira, et al., 2012.

A dinâmica das placas Africana e Sul-Americana durante a fase de *rifte* e de deriva continental é dividida em três domínios distintos quando considerados a natureza e a orientação dos campos de tensões regionais: Uma região predominantemente extensiva, entre o sul da Argentina e o extremo nordeste da costa brasileira; um segmento de natureza transformante, que corresponde ao Atlântico Equatorial; e a região ao norte da Foz do Amazonas, onde novamente operam processos de caráter extensivo (MILANI, 2000, p. 358).

Na região do Atlântico Equatorial, os trechos de direção E-W estão diretamente relacionados à nucleação das zonas de fraturas oceânicas em áreas de crosta continental, enquanto que os trechos NW-SE refletem a ruptura oblíqua dos antigos crátons pré-cambrianos durante a separação continental (ZALÁN, 2004, p. 1) (Figura 3).

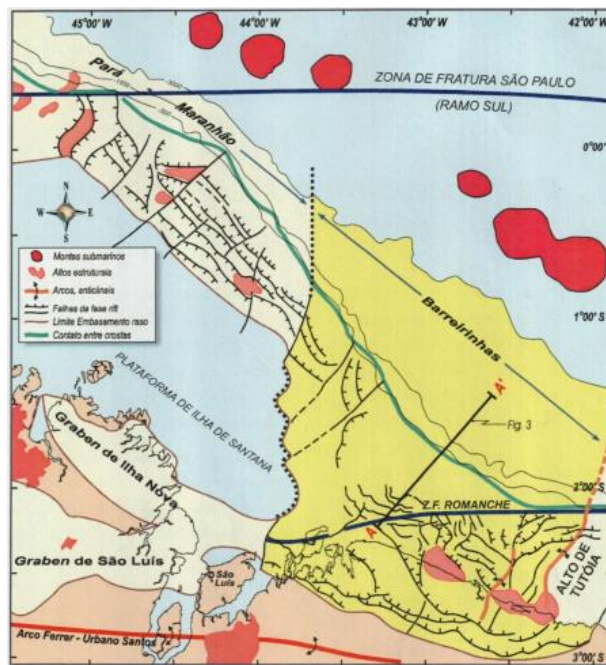


Figura 3 - Localização, limites e arcabouço estrutural, ao nível da seção rifte, da bacia de Barreirinhas. Fonte: Zálán, (2004).

Segundo Brandão & Feijó (1994) a Bacia Barreirinhas é composta por três sequências tectono-estratigráficas: sequência Rife (Pré Aptiana), sequência Pós Rife e sequência de Margem Passiva (drifte).

A Sequência Rife é representada pelo Grupo Canárias, de idade mesoalbiana, composta por uma seção de arenitos líticos imaturos, siltitos e folhelhos esverdeados. Estes estratos são

interpretados como depósitos de leques deltaicos responsáveis pelo preenchimento precoce da bacia (MILANI, 2000, p. 362).

O estágio Pós Rifte na evolução da margem é representado pelos Grupos Caju e Humberto de Campos. O primeiro de idade nealbiana é composto principalmente por carbonatos de ambientes nerfíticos de alta e baixa energia. O segundo Grupo é constituído por um clássico complexo sedimentar plataformaltalude-bacia, sendo a Formação Travosas composta por fácies de águas profundas associadas a arenitos de fluxos turbidíficos, (BRANDÃO & FEIJÓ, 1994, p 104; MILANE, 2000 p. 362).

No estágio drifte, na região da plataforma/talude da bacia, predominam os sistemas extensivos-compressivos gravitacionais, estes induzidos pela movimentação das seqüências sedimentares sobre o descolamento de um ou mais níveis de folhelhos despressurizados (DA CRUZ et al., 2009, p.1) e formando verdadeiros cinturões gravitacionais de dobramento e cavalgamento (*gravitational-folding-and-thrust belts*) frequentemente observados em águas ultraprofundas (ZALÁN, 2001 p.1; ZALÁN, 2004, p. 6).

O sistema extensivo-compressivo associado a superfície de descolamento pode ser dividido em três domínios tectônicos: extensional, translacional e compressional (Figura 4). O domínio extensivo é caracterizado por falhas normais lítricas associadas a anticlinais de *rollover* e cunhas sedimentares sintectônicas, sendo abundante também a presença de falhas antitéticas à falha principal (ZALÁN, 2001, p.1).

O domínio translacional é predominantemente não deformado, podendo haver leve arqueamento das rochas. No domínio compressional, geralmente chamado de Cinturões gravitacionais de dobras e cavalgamentos, é possível observar todos os tipos de falhas inversas, de empurrão, e ainda de diversos tipos de dobras relacionadas às falhas (*fault-related folding*): dobras de descolamento (*detachment folds*), dobras de propagação de falhas (*fault-propagation-folds*) e dobras de inflexão de falha (*fault-bending folds*). Descritas por Zalán (1998, 2001, 2005).

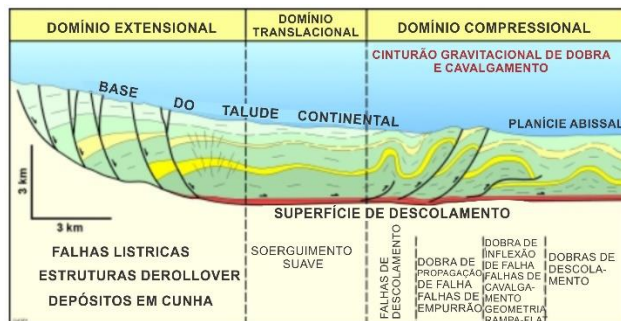


Figura 4 - Ilustração do Sistema Extensivo-Compressivo com seus domínios e principais estruturas presentes em cada um deles. Fonte: Zalán (2011).

Os movimentos de massa gravitacional e as estruturas a eles associadas podem ser gerados devido ao deslizamento dos sedimentos instáveis que foram rapidamente depositados através

de nível basal de descolamento, induzido pela inclinação do fundo do mar (PEROVANO et al., 2009, p. 460; OLIVEIRA et al., 2012, p. 1). Os movimentos ocorrem quando sedimentos finos ou rochas fraturadas são submetidos aos efeitos de furacões, grandes tempestades ou altas pressões nos poros (OLIVEIRA et al. 2012, p. 1).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Para execução do presente trabalho foi considerado um fluxograma que considera desde a escolha e carregamento dos dados em software de interpretação até a construção do arcabouço estrutural pela modelagem 3D (Figura 5).

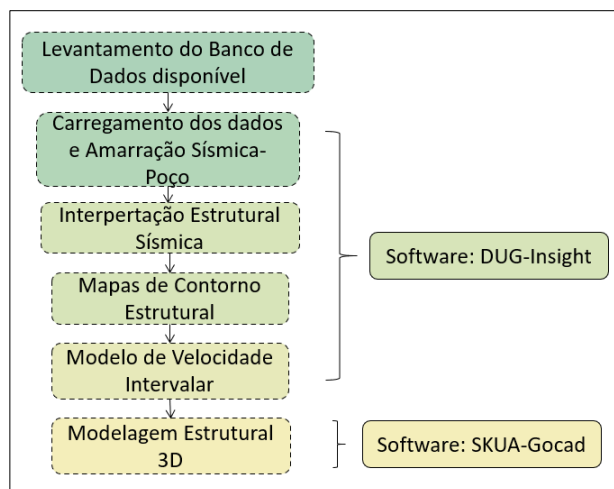


Figura 5 - Fluxograma seguido para execução deste trabalho.

Os dados utilizados neste trabalho pertencem ao levantamento sísmico pré-stack 3D 0264_BM_BAR_1, o qual cobre parte da área centro-sul da Bacia de Barreirinhas emersa. Também foram utilizadas informações sísmicas e dados de poços advindos de 2 poços existentes dentro da área de estudo: 1-BRSA-729-MAS (MAS-35) e 1-BRSA-1015-MAS (MAS-36) (Figura 6). Essa base de dados foi fornecida pelo Banco de Dados de Exploração e Produção - Agência Nacional do Petróleo (BDEP-ANP).

O levantamento sísmico 3D foi adquirido conforme as feições estruturais Dip e Strike (*inline* e *crossline*), respectivamente, em NW-SE e SW-NE, contemplando a quebra do talude e se estendendo até a o sopé continental em águas profundas a ultraprofundas, onde a combinação de uma espessa camada de sedimento, um declive íngreme da superfície da bacia e uma suave inclinação basal em direção ao talude comumente gera uma tensão de cisalhamento que promove o deslizeamento para baixo do talude continental (DAVIS et al., 1983; DAHLEN, 1984).

Na Figura 6 estão representadas o grid da *survey* do levantamento sísmico com as linhas e traços (*inline* e *crossline*), a área de estudo e a localização das seções que serão apresentadas ao longo deste trabalho (il 4139, il 3589, il 3579 e Arblines).

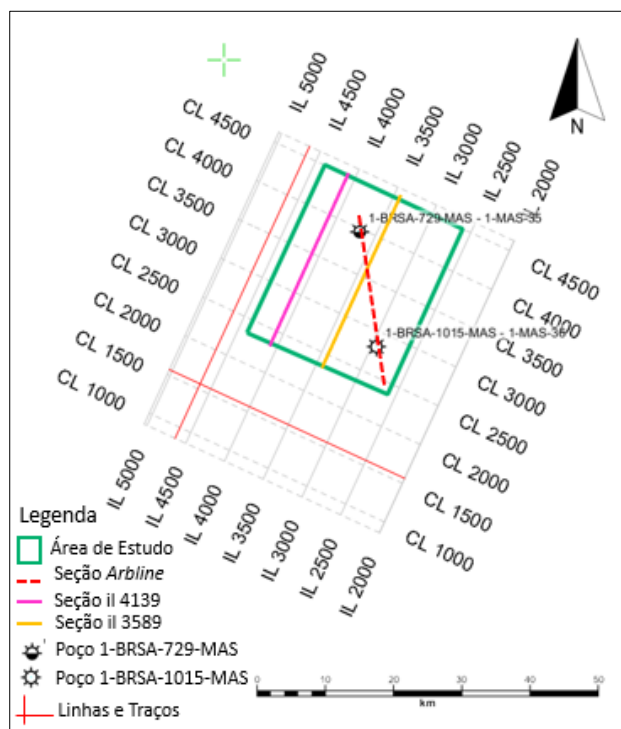


Figura 6 - Levantamento sísmico pré-stack 3D 0264_BM_BAR_1 na área de estudo. Nota-se a orientação NW-SE e SW-NE das linhas e traços.

O conjunto de dados foi posteriormente carregados no software *DUG-Insight*, onde se realizou o fluxo tradicional de interpretação com o mapeamento de refletores que evidenciassem características que ajudassem na descrição e identificação dos tipos de estruturas subsuperficiais relacionadas a movimentos e fluxo de massa e associadas a formação dos cinturões gravitacionais de dobras e cavagamento.

As superfícies mapeadas foram definidas a partir da integração das informações dos perfis compostos dos poços disponíveis e da correlação com os refletores presentes na reflexão sísmica, de acordo com as variações no comportamento dos perfis elétricos e contraste dos refletores sísmicos.

As informações sísmicas e os dados do poço também foram usados para fazer a “amarração sísmica-poço”. Os horizontes sísmicos foram interpretados e os dados foram convertidos do domínio do tempo para o domínio da profundidade através de um modelo de velocidade intervalar obtido no poço 1-BRSA-729-MAS (MAS-35) e também de informações de *checkshot*.

Por fim, foram confeccionados os mapas de contorno estrutural do topo das superfícies e as falhas a elas associadas, exportados, e carregados na plataforma Skua-GOCAD onde foi desenvolvida a modelagem do arcabouço estrutural 3D.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As feições estruturais mapeadas neste trabalho foram relacionadas à tectônica gravitacional (ZALÁN, 1998 p.362; TROSDTORF et al, 2007, p.335; ZALÁN, 2001 p.2; 2005) em

que o mecanismo de formação está associado a processos de colapsos gravitacionais na plataforma e compressões na região da crosta oceânica, particularmente em regiões afetadas por zonas de fraturas (AZEVEDO et al, 2012 p.2).

Além do mapeamento sísmico das falhas, foram mapeados seis horizontes sísmicos, possibilitando então a elaboração do arcabouço estrutural condizente com o tempo geológico adequado.

3.1. Domínio compressional do sistema extensivo-compressivo na bacia de Barreirinhas

A partir da interpretação dos dados sísmicos, foi possível identificar e mapear planos de falhas inversas e de empurrão, dobras de propagação de falha (*fault propagation fold*) e dobras de inflexão de falha (*fault bend fold*), na região que se estende desde o talude até o sopé continental, e estão conectadas via superfície de descolamento basal. Estas estruturas estão intrinsecamente associadas ao colapso gravitacional das sequências marinhas da bacia, que consequente se comprimem na região da crosta oceânica, em ambiente marinho profundo (águas profundas e ultraprofundas com batimetria entre 1400 a 2200 m). A deformação dos sedimentos indica a presença de esforço de natureza compressiva em função da acomodação do colapso gravitacional, e caracterizam o *domínio compressivo distal* de um sistema extensional-compressional. Conceitualmente estas feições são chamadas de Cinturões Gravitacionais de Dobras e Cavagamentos -GFTB's (ZALÁN, 2001, p.3).

A região deformada pela frente de empurrão apresenta orientação NW-SE, e tem cerca de 16 km de extensão em paralelo a linha de costa (Seção *Strike*) e 21 km no sentido plataforma-talude-sopé continental (Seção *Dip*), resultando em uma área total deformada de aproximadamente 336 km². Essas estruturas estão a aproximadamente 5500 m de profundidade abaixo do assoalho oceânico, que podem atingir mais de 2000 m de lâmina d'água, sendo tempo sísmico de trânsito de 5800 milissegundos. Os planos de falhas de cavagamento se apresentam com uma extensão de cerca de 20 km de comprimento e o distanciamento entre eles se dá, em média, a 6,5 km.

A interpretação sísmica realizada mostra que o deslizamento da seção marinha da bacia ocorreu ao longo de uma única superfície de descolamento (nível basal). O imbricamento das falhas de empurrão ramificou-se para cima da superfície de descolamento, onde há presença de dobramentos relacionados aos falhamentos, os quais refletem o encurtamento da crosta superior. Fazendo correlação com os estudos existentes, essa superfície de descolamento é formada por folhelhos e/ou margas superpressurizados do Cretáceo Superior/Paleógeno (DA CRUZ et al, 2009, p.1; KRUEGER et al, 2012, p.12; OLIVEIRA et al, 2012, p.174).

Como resultado da zona compressiva afetada temos um conjunto de falhas e dobras associadas, que estão ilustradas através das seções sísmicas il 3589; il 3579, il 34139 e Arbline. Na seção sísmica il 3589 (Figura 7) são observadas uma dobra de inflexão de falha (*fault bend fold*) à SSW e uma dobra de propagação de falha (*fault propagation fold*) à NNE. Esta seção tem uma orientação SW-NE, que se encontra na parte central da área de estudo e existem outras estruturas relacionadas ao

desenvolvimento da deformação. Essas dobras estão acompanhadas por feições com vergência de direção SSW, oposta a falha principal, e foram interpretadas como feições de retro-empurrão (*backthrust*).

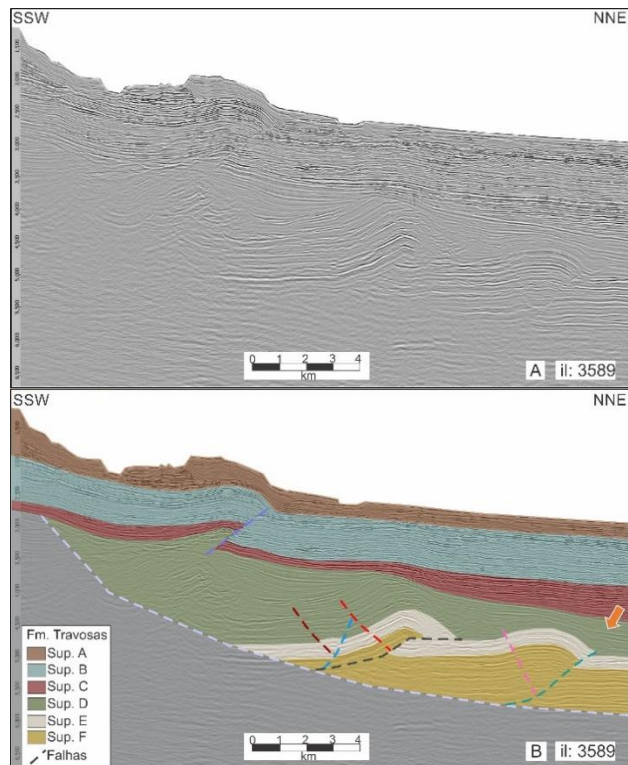


Figura 7 - Seção sísmica il 3589 no domínio do tempo. (A) Não interpretada e (B) Interpretada. Nota-se uma dobra de inflexão de falha (*fault bend fold*) à SSW e uma dobra de propagação de falha (*fault propagation fold*) à NNE, acompanhadas de feição de retro-empurrão (*backthrust*). A seta laranja mostra o espessamento da seção ao longo da frente compressiva e dobramento das camadas sintectônicas.

O retro-empurrão (*backthrust*) se refere a uma falha de empurrão com vergência oposta àquela do esforço principal ou ao do cinturão de cavalgamento (McCLAY,1992, p. 419). Foi considerado como um retro-empurrão pois se percebe um deslocamento desses refletores, como ilustrados pelas linhas tracejadas (brancas e pretas) na seção sísmica il 3579 (Figura 8). A estruturação resultante do processo é análoga ao de um *pop-up*.

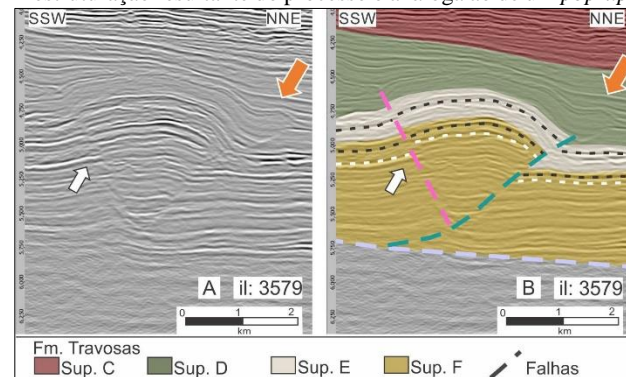


Figura 8 – Zoom específico da seção sísmica il 3579 no domínio do tempo. (A) Não interpretada e (B) Interpretada. Detalhe da dobra de inflexão de falha (*fault bend fold*) acompanhada por feição de retro-empurrão (*backthrust*). As linhas tracejadas, brancas e pretas, mostram o deslocamento dos refletores.

A seção il 4139 (Figura 9), que se localiza à noroeste da área, marca um dos limites da área de deformação e conseqüentemente das principais estruturas encontradas. Na área mais a sul (SSW) da seção il 4139 foi mapeada uma dobra de propagação de falha (*fault propagation fold*) em que sua gênese está relacionada a propagação do empurrão, rampa acima, avançando sobre os estratos não deformados (McCLAY,1992, p. 428).

Na região central da seção anterior, seguindo para norte (NNE), observa-se a formação de uma dobra de inflexão de falha (*fault bend fold*), esta é normalmente gerada através de movimentos de imbricamento de uma camada sobre uma rampa (McCLAY,1992, p. 428). A última falha observada nesta mesma seqüência, na direção NNE da seção sísmica il 4139, também foi considerada como uma dobra de propagação de falha (*fault propagation fold*).

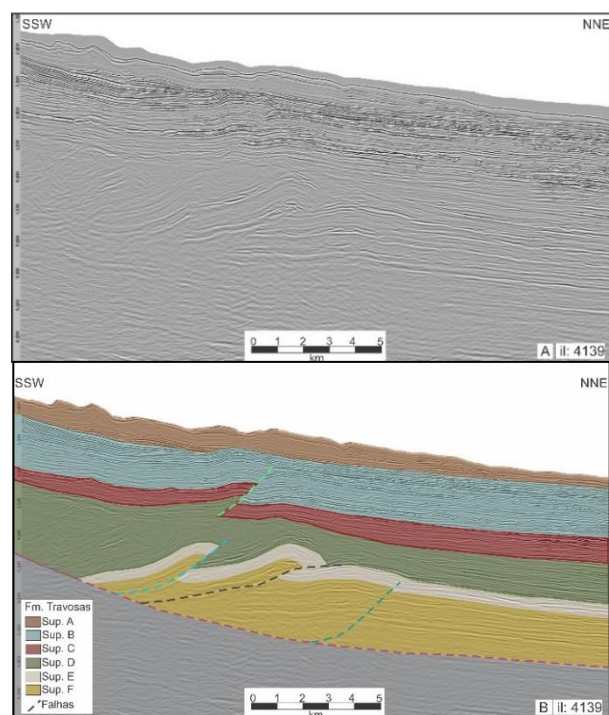


Figura 9 - Seção sísmica il 4139 no domínio do tempo. A) Não interpretada e (B) Interpretada. Dobra de propagação de falha à SSW da seção. Dobra de inflexão de falha, no centro da seção sísmica e, à NNE, dobra de propagação de falha.

A deformação é provavelmente iniciada com dobramentos que dão origem a imbricamentos de falhas reversas e que, com a evolução da deformação formam falhas de cavalgamento que podem, ou não, vir a ser acompanhadas por feições de rampa-plato (*ramp-and-flat thrust fault*) e feições de retro-empurrão (*backthrust*). Os planos de falha aumentam o ângulo de mergulho, verticalizam-se, e em seguida passam a se movimentar horizontalmente. A resistência ao movimento horizontal aumenta até que as camadas são impossibilitadas de deslizar, se dobrando e, conseqüentemente, formando anticlinais. (PEROVANO *et al.*, 2009, p. 472)

Ainda segundo a interpretação, o colapso gravitacional comprimiu as unidades pré-tectônicas, sendo observado um encurtamento sindeposicional. O efeito final do encurtamento é o espessamento da seção ao longo da frente compressiva e dobramento das camadas sintectônicas, representado através da seta laranja nas Figuras 7 e 8 acima. Existem muitas estruturas sindeposicionais e posdeposicionais, as quais evidenciam reativações posteriores a formação dos cinturões gravitacionais de dobramento e cavalgamento, como a falha inversa interpretada nos estratos superiores vista nas seções apresentadas, mas que não serão detalhadas neste trabalho.

Através da seção Arbline (Figura 10) que passa pelos dois poços exploratórios existentes na região (1-BRSA-729-MAS e 1-BRSA-1015-MAS), e dos dados de perfil composto, nota-se que o poço 1-BRSA-729-MAS testou os reservatórios turbidíticos do ápice de uma estrutura anticlinal, análoga ao *pop-up*, formada pela conseqüente deformação da dobra de propagação de falha

(*fault propagation fold*) e do retro-empurrão (*backthrust*) que a acompanha.

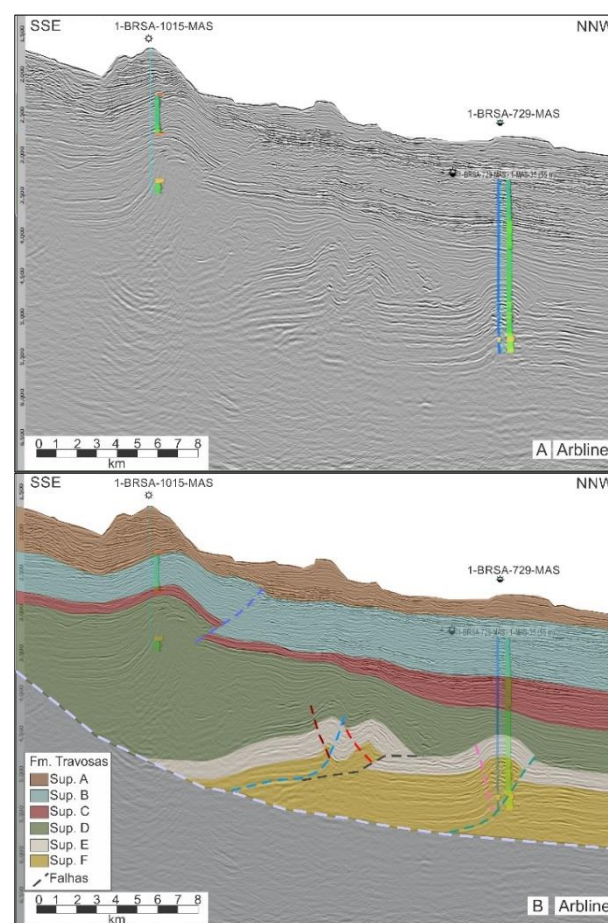


Figura 10 - Seção sísmica Arbline, no domínio do tempo. (A) Não interpretada e (B) Interpretada. Seção passando pelos dois poços exploratórios existentes na região (1-BRSA-729-MAS e 1-BRSA-1015-MAS). Nota-se que o poço 1-BRSA-729-MAS testou uma estrutura anticlinal formada pela conseqüente deformação da dobra de propagação de falha (*fault propagation fold*) e do retro-empurrão (*backthrust*) que a acompanha.

Foram reportados indícios de gás nesses reservatórios turbidíticos da Formação Travosas, validando o sistema petrolífero na área. Este poço foi classificado como seco com indícios de gás e abandonado definitivamente. O poço 1-BRSA-1015-MAS é menos profundo e testou reservatórios mais novos da Formação Travosas em uma estrutura anticlinal associada a estruturas que deformam os sedimentos pós tectônicos, formados por reativações mais recentes do que as principais estruturas enfatizadas neste trabalho. Este poço também apresentou indícios de gás e foi classificado como um poço portador de gás.

Para Oliveira *et al.*, 2012 (p.165) a análise geométrica de falhas, dobras e estratos de crescimento vistos nos perfis sísmicos que abrangem esta região, permite caracterizar a propagação das

falhas lítricas normais (no domínio extensional) e falhas de cavalgamento como uma sequência inversa (*backstep sequence*). Nesta sequência as falhas normais e inversas são mais jovens em direção ao continente, com a consequente migração dos depocentros para a terra durante o tempo geológico, caracterizando um cavalgamento fora de sequência (*out-of-sequence thrusts*).

3.2. Mapas Estruturais

Para um melhor entendimento dos mecanismos controladores da tectônica gravitacional na Bacia de Barreirinhas, foram confeccionados mapas de contorno estruturais da cobertura sedimentar sintectônica, onde é possível observar as áreas que foram elevadas e as áreas que foram deprimidas com o desenvolvimento das estruturas que formam os cinturões gravitacionais de dobras e cavagamento.

Características que auxiliaram na descrição e identificação dos tipos de estruturas subsuperficiais associados a formação dos cinturões gravitacionais de dobras e cavagamento são apresentadas através das superfícies de contorno estruturais denominadas E e F, mapeadas próximo à superfície de destacamento, presente no domínio do tempo (Figura 11).

Através dos mapas estruturais das superfícies é possível observar que as frentes de empurrão que formam o cinturão gravitacional de dobramento e cavagamento apresentam orientação noroeste-sudeste e formam grandes dobramentos e consequentes anticlinais. O estilo estrutural do cinturão de dobramento é típico de um sistema tectônico de “folhas delgadas” (*thin-skinned*) como mecanismo de deformação, em que os esforços tectônicos não afetaram o embasamento, onde há deformação somente na cobertura sedimentar. A região deformada pela frente de empurrão apresenta orientação NW-SE, e tem cerca de 16 km de extensão em paralelo a linha de costa (Seção Strike) e 21 km no sentido plataforma-talude-sopé-continental (Seção Dip), resultando em uma área total deformada de aproximadamente 336 km². Essas estruturas estão a aproximadamente 5500 m de profundidade abaixo do assoalho oceânico, que podem atingir mais de 2000 m de lâmina d’água, sendo tempo sísmico de trânsito de 5800 milissegundos. Os planos de falhas de cavagamento se apresentam com uma extensão de cerca de 20 km de comprimento e o distanciamento entre eles se dá, em média, a 6,5 km.

A maior parte da deformação compressiva, diferentemente das falhas normais comuns do regime distensivo, não atinge o fundo submarino atual, demonstrando que o processo deformacional cessou formando um paleo-cinturão de dobramento e cavagamento soterrado na região do sopé continental.

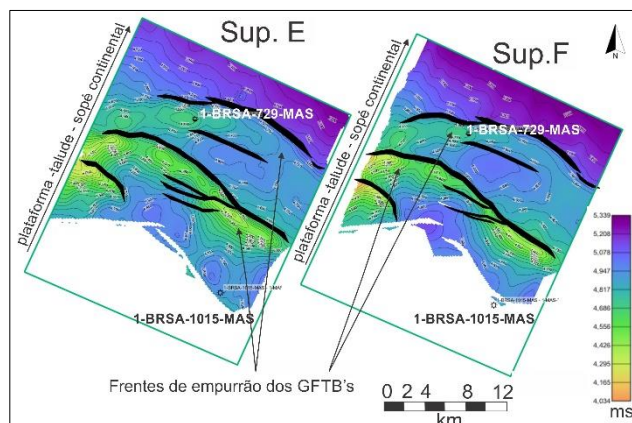


Figura 11 - Mapas de contorno estrutural dos sedimentos sintectônicos, no domínio do tempo, do topo das superfícies nomeada de E e F.

3.3. Modelagem Estrutural 3D

A construção do modelo estrutural 3D, realizada através do software Skua-Gocad, e desenvolvida através das superfícies e dos planos de falhas a eles associados que haviam sido interpretados na etapa anterior. Primeiramente foi realizada a conversão do domínio do tempo para o domínio da profundidade através de um modelo de velocidade intervalar obtido no poço 1-BRSA-729-MAS (MAS-35) e também de informações de *checkshot* para que a modelagem estrutural 3D fosse desenvolvida no domínio da profundidade. A visualização 3D dos cinturões gravitacionais de dobramento e cavagamento destaca as variações geométricas que foram encontradas ao longo dos diferentes perfis e estratos interpretados.

As Figuras 12 e 13 ilustram a visualização 3D do arcabouço estrutural interceptado com as seções sísmicas il: 3589 e il: 4139 respectivamente, no sentido plataforma-talude-sopé continental (esquerda para direita).

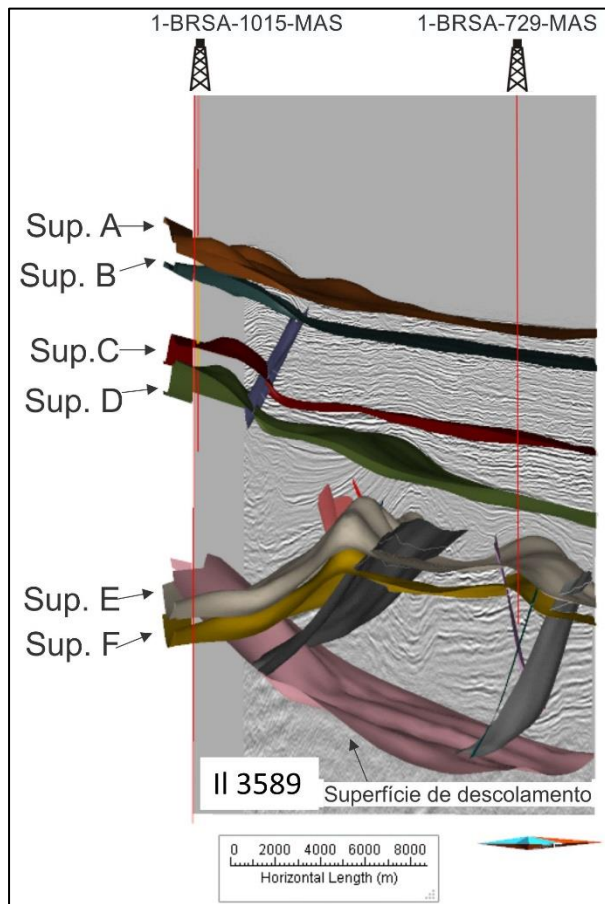


Figura 12 - Visualização 3D do arcabouço estrutural interceptado com a seção sísmica il: 3589.

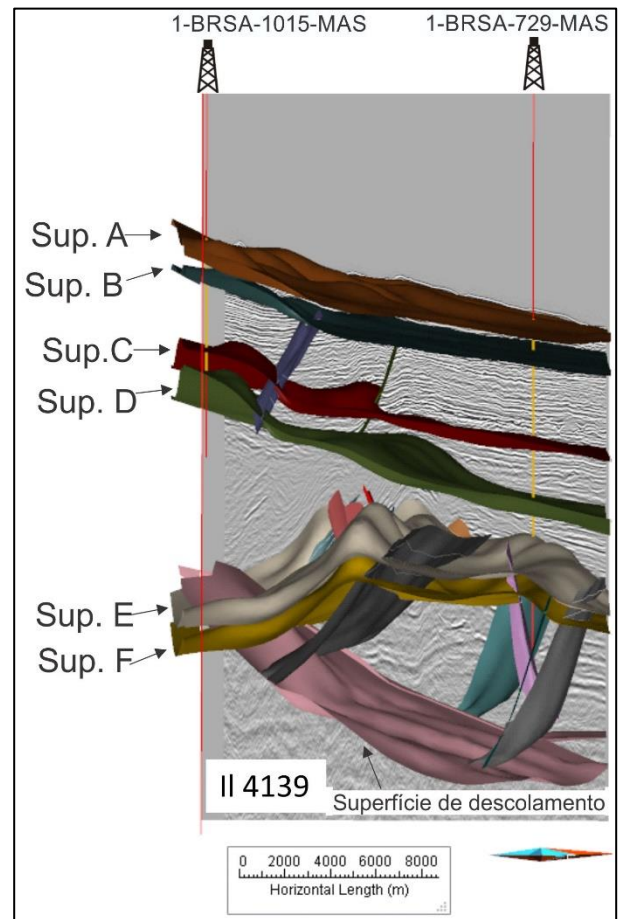


Figura 13 - Visualização 3D do arcabouço estrutural interceptado com a seção sísmica il: 4139.

A Figura 14 dá enfoque às duas superfícies mais profundas que foram mapeadas e às falhas que as afetaram. Nestas superfícies estão impressas as deformações mais relevantes e, conseqüentemente, é aonde se nota com maior facilidade as estruturas que compreendem as frentes de empurrão dos cinturões gravitacionais de dobramento e cavalgamento. Na parte inferior da seção é representada a superfície de descolamento em que a deformação é estabelecida através do imbricamento das falhas de empurrão as quais se ramificam para cima destas superfícies e provocam as dobras associadas às falhas.

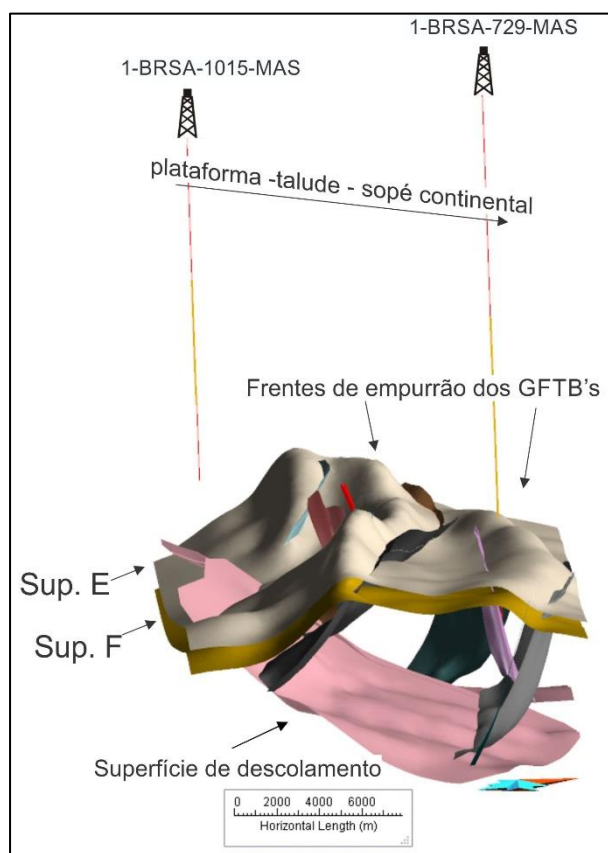


Figura 14 - Representação das duas superfícies mais afetadas pelos esforços e falhas a elas associadas. Nota-se, com maior facilidade, as estruturas que compreendem as frentes de empurrão dos cinturões gravitacionais de dobramento e cavalgamento.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As estruturas mapeadas na área de estudo estão inseridas dentro do domínio compressional de um grande sistema extensivo-compressivo. Correspondem a frentes de empurrão dos ditos Cinturões Gravitacionais de Dobras e Cavalgamentos (GFTB's) as quais estão intrinsecamente associadas ao colapso gravitacional das sequências marinhas da bacia e consequente compressão na região da crosta oceânica. O colapso gravitacional comprimiu as unidades pré-tectônicas e um encurtamento sindeposicional. O efeito final do encurtamento é o espessamento da seção ao longo da frente compressiva e dobramento das camadas sintectônicas.

Através dos mapas estruturais elaborados nota-se que as frentes de empurrão presentes na área apresentam orientação NW-SE com cerca de 16 km de extensão em paralelo a linha de costa (Seção Strike) e 21 km no sentido plataforma-talude-sopé-continental (Seção Dip), resultando em uma área total deformada de aproximadamente 336 km². Essas estruturas estão a aproximadamente 5500 m de profundidade abaixo do assoalho oceânico com mais de 2000 m de lâmina d'água, sendo tempo sísmico de trânsito de 5800 milissegundos. Os planos de falhas de

cavalgamento se apresentam com uma extensão de cerca de 20 km de comprimento e o distanciamento entre eles se dá, em média, a 6,5 km.

Identificou-se a presença de falhas inversas e falhas de empurrão, de dobras relacionadas a falhas, como dobra de inflexão de falha (fault bend fold) e dobra de propagação de falha (fault propagation fold), além de feições de retro-empurrão (backthrust). Essas geometrias são mais implícitas de uma deformação plástica do folhelho. Essas estruturas estão conectadas por uma única superfície basal de descolamento e chegam às águas ultraprofundas da bacia de Barreirinhas. O comportamento desta superfície é característico de um sistema tectônico de "folhas delgadas" (*thin-skinned tectonic system*), em que os esforços tectônicos não afetaram o embasamento.

Além disso, a maior parte da deformação compressiva não atinge o fundo submarino atual, demonstrando que o processo deformacional cessou formando um paleo-cinturão de dobramento e cavalgamento soterrado na região do sopé continental.

Através das seções il 3589, il 3579, il 4139 e Arline apresentadas anteriormente parte do desenvolvimento das estruturas presentes na área pode ser observada. Uma dobra de inflexão de falha (fault bend fold) à SSW e uma dobra de propagação de falha (fault propagation fold) à NNE da seção sísmica il 3589. Essas dobras estão acompanhadas por feições com vergência de direção SSW, oposta a falha principal, que possivelmente são feições de retro-empurrão (backthrust), como visto em detalhe na il 3579.

As estruturas presentes na seção il 4139 evidenciam, à SSW, uma dobra de propagação de falha (fault propagation fold), região central da seção, seguindo para norte (NNE), uma dobra de inflexão de falha (fault bend fold), e à NNE da seção sísmica il 4139 outra dobra de propagação de falha (fault propagation fold).

Através da seção Arline, que atravessa os dois poços exploratórios existentes na região (1-BRSA-729-MAS e 1-BRSA-1015-MAS) e dados de perfil composto, nota-se que o poço 1-BRSA-729-MAS testou os reservatórios turbidíticos de uma estrutura anticlinal formada pela consequente deformação das dobras de inflexão de falha mapeadas nas seções. Esses reservatórios ainda compreendem um novo play em águas ultraprofundas da bacia Barreirinhas.

A deformação é provavelmente iniciada com dobramentos que dão origem a imbricamentos de falhas reversas e que, com a evolução da deformação, formam falhas de cavalgamento que podem vir ser constituídas por feições de retro-empurrão (backthrust).

A interpretação sísmica e consequente descrição dos tipos de estruturas presentes na área, bem como a compreensão dos mecanismos e cinemática dos processos que estão associados à formação dos cinturões gravitacionais de dobras e cavalgamentos foi importante para mostrar que estas áreas têm potencial real de petróleo ao correlacioná-los com modelos análogos que já possuem produção de hidrocarbonetos.

O mapeamento também contribuiu para dimensionar e destacar essas importantes estruturas.

A construção do modelo estrutural permitiu a visualização 3D do Cinturão Gravitacional de dobramento e cavalgamento sendo importante para representar as variações geométricas que estão presentes nos diferentes perfis e estratos interpretados ao longo

de toda área de estudo que são importantes para avaliar os mecanismos que impulsionam os sistemas de deslizamento gravitacionais de grande escala.

De acordo com Gilbert (2006), as diferenças geométricas implícitas na deformação plástica de folhelhos versus blocos de falha duplex impactam na maturação de hidrocarbonetos, na história de expulsão, e nas vias de migração dentro das estruturas. Portanto, é importante discriminar entre estruturas duplex e estruturas produzidas pela deformação plástica de folhelhos.

Esse trabalho de mapeamento sísmico das estruturas e a modelagem 3D do arcabouço estrutural-estratigráfico trouxe novas informações para identificação e avaliação das estruturas com potencial para acumulações de hidrocarbonetos.

A disponibilidade de dados em águas profundas e ultraprofundas na Bacia Barreirinhas ainda é muito pequena, mas a possibilidade de produção de hidrocarboneto na bacia é bastante relevante.

Com a disponibilidade de dados de mais poços, será possível integrar diferentes elementos geológicos. As informações deste trabalho podem servir de base ao modelo estrutural 3D para integração com os modelos 3D estratigráficos, litológicos e petrofísicos, com a representação da distribuição lateral e vertical, por meio da modelagem de propriedades como fácies, porosidade e permeabilidade, que são importantes para a diminuição do risco exploratório nessas regiões.

5. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. F. S.; SILVA, C. G.; REIS, A. T.; PEROVANO, R.; GORINI, C.; VENDEVILLE, B. C.; ALBUQUERQUE, N. C. Movimentos de Massa Multiescala na Bacia da Foz do Amazonas – Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geofísica*. v.27, n.3, 485-508, 2009.
- AZEVEDO, R. L.; BREHME, I. GAMBÔA, L. A. P. Atlântico Equatorial (Bacia Pará-Maranhão): *Geomorfologia, Tectônica Gravitacional e Arcabouço Depositional*. IX Simpósio Nacional de Geomorfologia. 1-3, 2012.
- BRANDÃO, J. A. S. L.; FEIJÓ, F. J. Bacia do Pará-Maranhão. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. v.8, n.1, 101-102, 1994.
- CORREDOR, F.; SHAW, J. H.; BILOTTI, F. Structural Styles in the deep-water fold and thrust belts of the Niger Delta. *AAPG Bulletin*. v. 89, n.6, 753-780, 2005.
- DA CRUZ, J. N.; SILVA, C. G.; REIS, A. T. Influência da Tectônica-Gravitacional da Bacia Pará-Maranhão na Sedimentação de Águas Profundas. *Eleventh International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, 2009.
- DAHLEN, F.A. Noncohesive critical Coulomb wedges: An exact solution: *Journal of Geophysical Research*, v. 89, n. 10, 125–133, 1984.
- DAVIS, D.; SUPPE, J.; DAHLEN, F.A. Mechanics of fold and thrust belts and accretionary wedges: *Journal of Geophysical Research*, v. 88, n. B2, 1153–1172, 1983.
- FEIJÓ, F. J. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobrás*. v.8, n.1, 103-109, 1994.
- GILBERT, E. Structural styles of shale-dominated gravity-driven thrusting, Southern Atlantic Margins of Africa and Brazil (abstract): American Association of Petroleum Geologists Hedberg Conference, Port of Spain, Trinidad and Tobago, 2006.
- GILBERT, E.; KRUEGER, A.; MURPHY, M. The Barreirinhas Basin, Equatorial Brazil: Pitfalls of “Structural Styles” analysis in frontier basins (expanded abstract): *Houston Geological Society*, v. 53, no.7, 2011.
- KRUEGER, A.; MURPHY, M.; GILBERT, E.; BURKE, K. Deposition and deformation in the deepwater sediment of the offshore Barreirinhas Basin, Brazil. *Geosphere*, v. 8, n. 6, 1-26, 2012.
- MCCLAY, K. R. Glossary of thrust tectonics terms. Surrey, England. Department of Geology, Royal Holloway and Bedford New College, University of London, Egham, Surrey, England, TW20 0EX, 491-433, 1992.
- MILANI, E. J.; BRANDÃO, J..A. S. L.; ZALÁN, P. V. Gamboa L.A.P. Petróleo na Margem Continental Brasileira: Geologia, Exploração, Resultados e Perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, v 18, n. 3, 352-396, 2000.
- OLIVEIRA, M. J. R.; ZALÁN, P. V.; CALDEIRA, J. L.; TANAKA, A.; SANTAREM, P.; TROSDTORF, I. Jr.; MORAES, A. Linked extensional-compressional tectonics in gravitational systems in the Equatorial Margin of Brazil, in D. Gao, ed., *Tectonics and sedimentation: Implications for petroleum systems*, *American Association of Petroleum Geologists Memoir*, v. 100, 159 – 178, 2012.
- PAVLOVSKI, T. B. L. *Modelagem Geológica e Estrutural 3D das Formações Los Molles e Lojas, Grupo Cuyo, Bacia de Neuquen (AR)*. Rio de Janeiro. Monografia (Bacharelado em Geologia). Programa de Graduação em Geologia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro-RJ, 2009.
- PELLEGRINI, B. S.; RIBEIRO, H. J. P. S. Exploratory plays of Pará-Maranhão and Barreirinhas basins in deep and ultra-deep waters, Brazilian Equatorial Margin. *Brazilian Journal of Geology*. [online]. 2018, v. 48, n 3, 485-502. 2018.
- PEROVANO, R.; REIS, A. T.; SILVA, V.G.; GORINI, C.; OLIVEIRA, V.; ARAÚJO, E. F. S. O Processo de Colapso Gravitacional da Seção Marinha da Bacia da Foz do Amazonas – Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geofísica*, v 27, n. 3, 459-484, 2009.
- SZATMARI, P.; BATISTA, J. L.; ZANOTTO, F. O.; WOLFF, S. Evolução Tectônica da Margem Equatorial Brasileira. *Revista Brasileira de Geociências*. v. 17, n. 2, 180-188, 1987.
- TROSDTORF JÚNIOR, I.; ZALÁN, P. V.; FIGUEIREDO, J. J.

- P.; SOARES, E. F. Bacia de Barreirinhas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, v 15, n. 2, 331-339, 2007.
- ZALÁN, P. V. Gravity-Driven Compressional Structural Closures in Brazilian Deep-Waters – A New Frontier Play. *American Association of Petroleum Geologists Annual Meeting Extended Abstracts*, v 2, 1-4, 1998.
- ZALÁN, P. V. Growth Folding in Gravitational Fold-and-Thrust Belts in the Deep Waters of the Equatorial Atlantic, Northeastern Brazil. *AAPG Annual Convention Official Program Book*, A223, 2001.
- ZALÁN P. V.; PALAGI, P. R.; SEVERINO, M. C. G.; MARTINS, F. A.L.; FERREIRA, E. P. Bacias Sedimentares Brasileiras – Bacia de Barreirinhas. *Fundação Paleontológica Phoenix*. v. 6, n. 64, 1-6, 2004.
- ZALÁN, P. V. End members of in the deep waters of Brazil, in J. H. Shaw, C. Connors, and J. Suppe, eds., Seismic interpretation of contractional fault-related folds: *AAPG Studies in Geology*, v. 53, 147–153, 2005.
- YANG, X.; PELL, F. J.; MCNEILL, L. C.; SANDERSON, D. J. Comparison of fold-thrust belts driven by plate convergence and gravitational failure. *Earth-Science Reviews*, v. 203. 1-21, 2020.

6. AGRADECIMENTOS

Aos meus colegas de trabalho e a empresa Imetame Energia. Ao Curso de Especialização em Análise de Bacias Sedimentares: Ênfase nas Regiões Equatoriais. À ANP pelo fornecimento dos dados.

Recebido em: 30/04/2021

Aceito para publicação em: 16/07/2021